

QUANTIFICAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS REABILITADOS

PEDRO NOGUEIRA MARTINS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Catedrático Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família e amigos,

AGRADECIMENTOS

Após a realização deste trabalho, não posso finalizar o meu percurso académico sem demonstrar o meu profundo agradecimento por algumas pessoas que dele fizeram parte.

Ao Professor Vasco Freitas, agradeço por todos os conhecimentos transmitidos neste último ano letivo, mais concretamente no decorrer deste trabalho, e todo o auxílio e inteira disponibilidade apesar da sua preenchida agenda. A sua dedicação à profissão é uma inspiração para mim.

À Sílvia Magalhães, agradeço por me ter cedido o modelo de simulação e informações da sua tese de doutoramento, que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço também pela ajuda e disponibilidade demonstrada ao longo de todo o trabalho.

Aos meus colegas e amigos Ina, Cátia, Sandra, Ribeiro e Zé, por terem partilhado comigo o melhor ano que passei na faculdade, tornando-o inesquecível. Agradeço por toda a amizade, apoio, entreatajuda e solidariedade constante, especialmente nos momentos mais difíceis. Esta fase tão importante da minha vida não teria sido a mesma sem vocês.

À minha mãe, agradeço por me dar um apoio incondicional e nunca me deixar desistir dos meus objetivos. Agradeço também por ter tido a paciência de ler a minha dissertação, mesmo não dominando os aspetos técnicos.

À Anna, agradeço por estar presente em todos os momentos da minha vida, apesar da distância. Mesmo falando uma língua diferente, foi uma ajuda fundamental na organização e redação deste trabalho, bem como na edição da maior parte das imagens.

RESUMO

Nas últimas décadas, as preocupações energéticas têm sido crescentes na Europa, levando à criação de Diretivas que estabeleceram exigências e limites regulamentares para o aumento da eficiência energética dos edifícios. Nesse sentido, a reabilitação de edifícios antigos torna-se importante por representar um enorme potencial de redução dos consumos energéticos.

No caso da presente dissertação, o objeto de estudo foi o edifício tradicional do Centro Histórico do Porto, onde a dinâmica de reabilitação tem aumentado nos últimos anos. Estes edifícios são caracterizados pelas paredes em alvenaria de granito e por pavimentos e coberturas em madeira, por caixilharias em madeira com vidros simples. As ações de reabilitação neste tipo de edifícios vão ao encontro da melhoria de soluções construtivas que aumentem a sua eficiência energética, para além da reparação de eventuais danos estruturais.

Foi realizada uma análise aos consumos energéticos médios anuais para o aquecimento das habitações portuguesas, considerando as principais fontes de energia utilizadas. Conclui-se que as famílias portuguesas gastam muito pouco dinheiro para aquecer as suas habitações devido aos seus baixos salários (em média), aos elevados preços de energia praticados e ao clima moderado em Portugal.

Foram avaliadas as necessidades de aquecimento e arrefecimento, para diversos cenários, que refletem medidas de melhoria da envolvente dos edifícios antigos do Centro Histórico do Porto. Utilizou-se a ferramenta de cálculo WUFI®Plus para realização de simulações higrótérmicas avançadas, tendo sido definida uma gama de temperaturas interiores de conforto térmico entre os 20 °C e os 25 °C. Estudou-se a influência de diferentes espessuras de isolamento da parede de fachada, diferentes tipos de vidro e proteções solares, e diferentes caudais de ventilação nas necessidades de energia para atingir o conforto térmico.

Com base nos resultados, foram apresentadas recomendações para a prática da reabilitação com o objetivo de reduzir os consumos energéticos dos edifícios em estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Desempenho Térmico, Edifícios Antigos, Reabilitação, Eficiência Energética, Simulação Numérica.

ABSTRACT

In the last decades, energy concerns have been growing in Europe, leading to the creation of directives that have established regulatory requirements and limits for increasing the energy efficiency of buildings. In this sense, the rehabilitation of old buildings becomes important as it represents an enormous potential for reducing energy consumption.

In the case of this dissertation, the object of study was the traditional building of the Historical Center of Porto, where the dynamic of rehabilitation has increased in recent years. These buildings are characterized by the walls in granite masonry and by wooden floors and roofs, and by wooden window frames with simple glazing. The rehabilitation actions in this type of buildings are in line with the improvement of constructive solutions that increase their energy efficiency, in addition to repairing possible structural damages.

An analysis was made of the annual average energy consumption for the heating of the Portuguese dwellings, considering the main sources of energy used. It was concluded that Portuguese families spend very little money to heat their homes because of their low wages (on average), high-energy prices and Portugal's moderate climate.

The heating and cooling needs were evaluated for several scenarios, which reflect measures to improve the envelope of the old buildings of the Historical Center of Porto. The WUFI®Plus calculation tool was used to perform advanced hygrothermal simulations, defining a range of internal temperatures of thermal comfort between 20 ° C and 25 ° C. It was studied the influence of different façade wall insulation thicknesses, different glass types, solar protections and ventilation flows in the energy needs which grant thermal comfort.

Based on the results, recommendations were made for the practice of rehabilitation in order to reduce the energy consumption of the buildings under study.

KEYWORDS: Thermal Performance, Old Buildings, Rehabilitation, Energy Efficiency, Numerical Simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1 Introdução	 1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO	2
 2 Reabilitação Energética de Edifícios Antigos do Centro Histórico do Porto	 5
2.1. OBJETIVO	5
2.2. TIPIFICAÇÃO DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS A REABILITAR	6
2.2.1. A CASA BURGUESA	6
2.2.2. PAREDES EXTERIORES	6
2.2.2.1. Paredes exteriores em alvenaria de pedra de granito	6
2.2.2.2. Paredes exteriores em tabique resistente	8
2.2.3. PAREDES DE COMPARTIMENTAÇÃO	9
2.2.4. VÃOS ENVIDRAÇADOS	9
2.2.5. PAVIMENTOS	10
2.2.6. COBERTURAS	10
2.3. TIPIFICAÇÃO DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO	11
2.3.1. INTRODUÇÃO	11
2.3.2. PAREDES EXTERIORES	12
2.3.3. VÃO ENVIDRAÇADOS	13
2.3.4. PAVIMENTOS	13
2.3.5. COBERTURAS	14
2.3.6. VENTILAÇÃO	14
2.4. SITUAÇÃO ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS EM PORTUGAL	15
2.4.1. CONSUMOS DOMÉSTICOS DE ENERGIA	16
2.4.2. CONSUMOS DOMÉSTICOS DE ENERGIA PARA AQUECIMENTO DO AMBIENTE	17
2.4.3. PREÇO DA ENERGIA	19

2.4.4. SALÁRIOS EM PORTUGAL	19
2.4.5. ANÁLISE CRÍTICA DO ESFORÇO FINANCEIRO PARA AQUECIMENTO DO AMBIENTE	20
2.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO	22

3 Metodologia

3.1. OBJETIVO	23
3.2. WUFI®PLUS - MODELOS DE SIMULAÇÃO	24
3.2.1. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA	24
3.2.2. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	25
3.3. DESCRIÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO	26
3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO EM ESTUDO	26
3.3.2. ESPECIFICAÇÕES DO MODELO TRIDIMENSIONAL	28
3.4. CONDIÇÕES INICIAIS E INTRODUÇÃO DE DADOS	30
3.4.1. ENVOLVENTE DA ZONA EM ESTUDO	30
3.4.2. CLIMA EXTERIOR	31
3.4.3. CLIMA INTERIOR	32
3.4.3.1. Condições de utilização	32
3.4.3.2. Climatização	32
3.4.4. CLIMA DE CAIXA DE ESCADAS – ESPAÇO NÃO ÚTIL	33
3.5. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO CONSIDERADOS PARA ESTUDOS DE SENSIBILIDADE	33
3.5.1. PAREDE DE FACHADA	34
3.5.2. VÃOS ENVIDRAÇADOS E PROTEÇÕES SOLARES	34
3.5.3. VENTILAÇÃO	36
3.5.4. ÁRVORE DE SIMULAÇÕES	36
3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO	39

4 Estudo de sensibilidade

4.1. OBJETIVO	41
4.2. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE ISOLAMENTO TÉRMICO DAS FACHADAS	41
4.2.1. NECESSIDADES DE ENERGIA PARA AQUECIMENTO	41
4.2.2. POUPANÇA DE ENERGIA	42
4.3. INFLUÊNCIA DO TIPO DE VÃO ENVIDRAÇADO E DA PROTEÇÃO SOLAR	43
4.3.1. NECESSIDADES DE ENERGIA PARA AQUECIMENTO	43
4.3.2. NECESSIDADES DE ENERGIA PARA ARREFECIMENTO	45

4.3.3. POUPANÇA DE ENERGIA	46
4.4. INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO	47
4.4.1. NECESSIDADES DE ENERGIA PARA AQUECIMENTO	47
4.4.2. POUPANÇA DE ENERGIA	49
4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO	50
 5 Análise e discussão de resultados	 51
5.1. OBJETIVO	51
5.2. NÍVEIS DE QUALIDADE	51
5.3. SOLUÇÃO PROPOSTA	56
 6 Conclusões	 57
6.1. RECOMENDAÇÕES PARA A PRÁTICA DA REABILITAÇÃO	57
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	58
 Referências bibliográficas.....	 59
 ANEXO A	 A1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Parede exterior em alvenaria de pedra de granito, no Porto	7
Figura 2 – Pormenor do revestimento exterior de uma parede de fachada, no Porto.....	8
Figura 3 – Parede em tabique, com pormenor do tabuado e fasquiado [18]	8
Figura 4 – Exemplos de vãos envidraçados do Centro Histórico do Porto: sem proteção solar (à esquerda) e com portadas interiores de madeira (à direita) [19]	9
Figura 5 – Estrutura de um pavimento de madeira definida por troncos assentes nas paredes [20] ..	10
Figura 6 – Predomínio de coberturas inclinadas a quatro águas revestidas a telha cerâmica, no Porto	11
Figura 7 – Soluções comuns de reabilitação de paredes exteriores com isolamento interior (adaptada, [22])	12
Figura 8 – Soluções comuns de reabilitação de vãos envidraçados (adaptada [19])	13
Figura 9 – Soluções comuns de reabilitação de pavimentos (adaptada, [21])	14
Figura 10 – Soluções comuns de reabilitação de coberturas (adaptada, [22])	14
Figura 11 – Esquema de ventilação natural [23].....	15
Figura 12 – Distribuição do consumo final de energia no setor doméstico, por fonte de energia [25].	16
Figura 13 – Distribuição do consumo de energia para aquecimento do ambiente, por fonte de energia [25].....	18
Figura 14 – Evolução do salário mínimo nacional entre 2011 e 2017, em Portugal [41]	20
Figura 15 – Interface geral do programa de simulação	24
Figura 16 – Quadro-resumo das potencialidades do programa utilizado (adaptada, [42]).....	25
Figura 17 – Representação das necessidades de energia útil (adaptada, [42])	26
Figura 18 – Alçado principal (à esquerda) e tardo (à direita) do edifício em estudo [42]	27
Figura 19 – Corte (à esquerda) e planta (à direita) da zona modelada do edifício em estudo	27
Figura 20 – Modelo tridimensional e destaque da zona de simulação	28
Figura 21 – Detalhe da zona em estudo e respetivos componentes	29
Figura 22 – Pormenor construtivo da parede exterior de fachada em estudo.....	30
Figura 23 – Representação da envolvente da zona em estudo	30
Figura 24 – Perfil de temperatura exterior utilizado no modelo de simulação	31
Figura 25 – Perfil de temperatura da caixa de escadas utilizado no modelo de simulação [42]	33
Figura 26 – Posição do isolamento térmico e propriedades das camadas	34
Figura 27 – Soluções consideradas da parede exterior de fachada.....	34
Figura 28 – Soluções consideradas dos vãos envidraçados	35
Figura 29 – Soluções consideradas da ventilação.....	36
Figura 30 – Árvore das simulações efetuadas	38

Figura 31 – Evolução das necessidades de aquecimento para as espessuras de isolamento consideradas	42
Figura 32 – Poupança de energia elétrica (€) correspondente às necessidades de aquecimento, variando a espessura de isolamento térmico face à solução sem isolamento	43
Figura 33 – Necessidades de aquecimento para diferentes tipos de vidro e proteções solares, com 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada	44
Figura 34 – Necessidades de arrefecimento para diferentes tipos de vidro e proteções solares, com 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada	45
Figura 35 – Poupança de energia nas necessidades de aquecimento, para cada tipo de vidro e proteção solar relativamente ao caso sem proteção solar	46
Figura 36 – Poupança de energia nas necessidades de arrefecimento, para cada tipo de vidro e proteção solar relativamente ao caso sem proteção solar	47
Figura 37 – Necessidades de aquecimento das soluções de ventilação para o vidro duplo corrente, com 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada	48
Figura 38 – Necessidades de aquecimento das soluções de ventilação para o vidro de baixa emissividade, com 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada	49
Figura 39 – Poupança de energia nas necessidades de aquecimento das soluções de ventilação consideradas, para cada tipo de vidro	49
Figura 40 – Níveis de qualidade segundo os consumos energéticos.....	51
Figura 41 – Classificação das soluções orientadas a Oeste segundo os níveis de qualidade	52
Figura 42 – Classificação das soluções orientadas a Sul segundo os níveis de qualidade	53
Figura 43 – Classificação das soluções orientadas a Norte segundo os níveis de qualidade	54
Figura 44 – Classificação das soluções orientadas a Este segundo os níveis de qualidade.....	55
Figura 45 – Solução ótima dos cenários simulados.....	56
Figura 46 – Soluções propostas.....	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Porção dos alojamentos coberta por cada fonte de energia [25]	16
Tabela 2 – Consumo anual doméstico, por fonte de energia e alojamento de residência habitual [13, 26-29]	17
Tabela 3 – Porção de energia consumida por fonte, para aquecimento do ambiente [25]	18
Tabela 4 – Consumo anual doméstico em aquecimento do ambiente, por alojamento e fonte de energia, entre 2011 e 2014	18
Tabela 5 – Preços de energia entre 2010 e 2014, por fonte de energia [13, 25-27, 31-40].....	19
Tabela 6 – Rendimentos médios mensais e anuais de famílias em Portugal, por escalões.....	20
Tabela 7 – Gastos anuais médios de energia em Portugal por alojamento e fonte, entre 2010 e 2014	21
Tabela 8 – Gastos anuais médios com energia para aquecimento do ambiente em Portugal por fonte de energia, entre 2010 e 2014	21
Tabela 9 – Compartimentos dos apartamentos presentes no modelo geométrico e respetivas áreas de pavimento e volumes	28
Tabela 10 – Breve descrição e características dos componentes da zona em estudo [42].....	29
Tabela 11 – Condições de utilização da zona em análise	32
Tabela 12 – Resumo das principais propriedades dos vãos considerados.....	35
Tabela 13 – Perfis de ventilação considerados	36
Tabela 14 – Necessidades globais para aquecimento e respetivos custos para as várias soluções da parede de fachada	42
Tabela 15 – Necessidades globais e gastos de energia para aquecimento, para as várias soluções dos vãos envidraçados com 2 cm de isolamento térmico	44
Tabela 16 – Necessidades e gastos de energia para arrefecimento, para as soluções dos vãos envidraçados com 2 cm de isolamento térmico	45
Tabela 17 – Necessidades globais e gastos de energia para aquecimento para as várias soluções de ventilação do vidro duplo corrente, com 2 cm de isolamento térmico	47
Tabela 18 – Necessidades e gastos de energia para aquecimento para as soluções de ventilação do vidro de baixa emissividade, com 2 cm de isolamento térmico	48

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

g_T – Fator solar global do vão envidraçado com os dispositivos de proteção 100% ativados

U – Coeficiente de Transmissão Térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

U_{wdn} – Coeficiente de Transmissão Térmica Médio Dia-Noite ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

AdEPorto – Agência de Energia do Porto

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis

BTN – Baixa Tensão Normal

DGEG – Direção-Geral de Energia e Geologia

EDP – Energias de Portugal

EPBD – Energy Performance of Buildings Directive

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

INE – Instituto Nacional de Estatística

LFC – Laboratório de Física das Construções

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

PORDATA – Base de Dados de Portugal Contemporâneo

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

REH – Regulamento dos Edifícios de Habitação

Rph – Renovações de ar por hora

SCE – Sistema de Certificação Energética

SRU – Sociedade de Reabilitação Urbana

TRY – Test Reference Year

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

As preocupações ambientais que, em 1997, motivaram o Protocolo de Quioto tornaram o aumento da eficiência energética em diversos setores uma prioridade. Nesse sentido, as políticas a aplicar não podiam menosprezar o papel dos edifícios, uma vez que estes representavam cerca de 40% do consumo energético Europeu, embora em Portugal essa percentagem seja inferior [1].

Desde então, foram criadas diversas Diretivas Europeias (*Energy Performance of Buildings Directives - EPBD*) com o intuito de melhorar o desempenho energético dos edifícios incentivando, entre outras medidas, a criação de exigências e limites regulamentares com base no consumo de energia primário ou final e a implementação de sistema de certificação energética nos edifícios [2]. As últimas Diretivas evoluíram no sentido da aplicação de requisitos mínimos mais rigorosos [3].

Em Portugal, a primeira regulamentação no âmbito da térmica de edifícios surgiu em 1990 (RCCTE [4]). Posteriormente, as Diretivas Europeias refletiram-se no alargamento das exigências com a reformulação da regulamentação da térmica dos edifícios (RCCTE revisto em 2006 [5] e, posteriormente, o REH (2013) [6], revisto em 2015 [7]) e com a criação de um sistema de certificação energética nos edifícios (SCE).

Os edifícios construídos até 1990 em Portugal, sem exigências térmicas e energéticas, representam cerca de 70% do parque edificado português [8]. Nesse sentido, a reabilitação torna-se fundamental para esses edifícios, intervindo na envolvente de modo a melhorar o conforto térmico e a qualidade do ar do seu interior, e reduzindo as necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento.

Para além da temática energética, a reabilitação permite preservar os edifícios mais antigos, objeto de estudo deste trabalho. Nos últimos 60 anos, as cidades portuguesas sofreram grandes transformações, crescendo para lá do centro e criando novos aglomerados urbanos. Em muitos casos, esse facto levou as pessoas a procurarem novos locais para habitar, mais modernos e distantes do centro histórico [9]. O despovoamento dos centros históricos contribuiu para a degradação generalizada dos edifícios aí localizados que representam uma valiosa herança cultural. Atualmente, os edifícios antigos (construídos antes de 1960) correspondem a 25% do património edificado português [8]. À data de 2011, mais de 60% dos edifícios construídos até 1919 apresentavam alguma necessidade de intervenção, sendo que 11% se encontravam muito degradados [10].

No caso em estudo do Centro Histórico do Porto a dinâmica de reabilitação tem sido crescente. Em 2005, a Porto Vivo desenvolveu o *Master Plan* que visava a promoção e planificação de intervenções de reabilitação que permitissem a revitalização da baixa do Porto [11]. A estratégia seguida foi a delimitação de zonas de intervenção, sendo que para o caso do Centro Histórico foram definidos diversos

programas de ação, como o do “Morro da Sé”, o das “Cardosas” e o de “Mouzinho/Flores”. Desde então, a Porto Vivo registou um aumento progressivo em variados indicadores, tendo o número de requerimentos crescido de 19 para 1309 e o número de alvarás de construção de 1 para 87 em 10 anos (de 2006 a 2016), tendo este último atingindo um máximo de 112 em 2015 [12].

Considerando os temas abordados, a realização deste trabalho é motivada pelo desafio atual de balancear corretamente a introdução de soluções de eficiência energética e a preservação da identidade histórica dos edifícios antigos. O foco passa pela revitalização dos edifícios históricos de modo a serem adaptados aos tempos atuais, sem serem desvirtualizados.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos principais do presente trabalho passam por:

- Avaliar o desempenho térmico e energético de edifícios antigos reabilitados do Centro Histórico do Porto, através de uma ferramenta de simulação higrotérmica avançada (*software* WUFI®Plus);
- Utilizar um modelo geométrico representativo dos edifícios em estudo e quantificar os consumos energéticos necessários para atingir o conforto térmico, considerando diversos cenários de reabilitação da envolvente, preservando a sua arquitetura;
- Realizar um estudo de sensibilidade sobre a influência, nos consumos de energia, da alteração da espessura de isolamento térmico nas paredes de fachada, do tipo de vãos envidraçados e proteção solar, e da ventilação, sendo cada caso avaliado orientando o edifício a Norte, Sul, Este e Oeste;
- Identificar os cenários de simulação considerados no estudo de sensibilidade que apresentem as menores necessidades de energia totais (aquecimento e arrefecimento do ambiente);
- Catalogar os resultados em níveis de qualidade que permitam uma maior facilidade na análise;
- Definir recomendações para a prática da reabilitação nos edifícios em estudo.

Os objetivos secundários deste trabalho estão relacionados com os resultados do estudo de sensibilidade, tendo-se procurado obter resposta às seguintes perguntas:

- Qual a orientação da fachada do edifício que garante maior poupança de energia?
- Qual a espessura de isolamento térmico ideal que minimiza as necessidades de energia para aquecimento?
- Qual o vidro ideal, para cada orientação, que minimiza as necessidades de energia útil?
- Qual a eficácia da proteção solar na redução das necessidades de arrefecimento?
- Qual o grau de benefício da proteção exterior face à interior considerando, porém, que a proteção exterior não se aplica aos edifícios em estudo?
- Qual o caudal de ventilação que garante os menores consumos energéticos?

1.3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação encontra-se subdividida em 6 capítulos que passam a ser descritos.

No capítulo 1 é feito um breve enquadramento à temática em estudo, que aborda a reabilitação energética dos edifícios antigos do Centro Histórico do Porto. São também definidos os objetivos do presente trabalho.

No capítulo 2 é caracterizado o edifício tradicional do Centro Histórico do Porto e os seus elementos construtivos. É abordada a temática da reabilitação energética, sendo feita uma exposição das principais

soluções de reabilitação para cada elemento. É também realizada uma análise dos consumos energéticos anuais e respetivos gastos para aquecimento do ambiente das habitações em Portugal.

No capítulo 3 descreve-se a metodologia seguida na realização de simulações higrotérmicas avançadas através do programa WUFI®Plus, descrevendo o modelo geométrico utilizado e detalhando as condições iniciais de introdução de dados. São igualmente descritos os cenários de simulação considerados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações efetuadas, através de análises comparativas dos consumos energéticos e da poupança de energia em relação aos casos de maior consumo.

No capítulo 5 são definidos níveis de qualidade para os cenários de simulação considerados, sendo apresentadas as soluções ideais para cada orientação.

No capítulo 6 são definidas recomendações para a prática da reabilitação nos edifícios em estudo, bem como desenvolvimentos futuros ao trabalho realizado.

2

REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS ANTIGOS DO CENTRO HISTÓRICO DO PORTO

2.1. OBJETIVO

Nos últimos anos, verificou-se um crescimento do peso relativo de obras de reabilitação em Portugal, tendo atingido os 34,1% em 2014, facto que também é suportado pela diminuição do número de obras de construção nova [13].

Esta tendência de reabilitação não pode descurar determinadas preocupações, não só a nível estrutural, mas também a nível cultural e ambiental. Apenas a conjugação de todos esses fatores pode permitir que a reabilitação seja pensada e contextualizada.

Perante a necessidade de reabilitar o património edificado em Portugal, torna-se importante criar condições para que se possam ajustar as edificações mais antigas às exigências atuais de consumo de energia e de certificação energética.

A presente dissertação incide no estudo da construção tradicional dos edifícios antigos do Centro Histórico do Porto, tendo em conta os materiais utilizados e as tecnologias e soluções construtivas adotadas à data da sua construção.

A proposta será estudar possíveis soluções de reabilitação para os edifícios em estudo, com vista à melhoria do seu desempenho térmico e energético, numa perspetiva de poupança de energia e aumento do conforto térmico interior.

2.2. TIPIFICAÇÃO DA ENVOLVENTE DOS EDIFÍCIOS A REABILITAR

2.2.1. A CASA BURGUESA

A caracterização de um sistema de construção é a base de qualquer avaliação de soluções de reabilitação [9]. No âmbito desta dissertação, torna-se imprescindível estudar a construção tradicional do Centro Histórico do Porto, bem como tipificar as novas soluções construtivas utilizadas aquando da sua reabilitação.

A construção tradicional em Portugal está relacionada com a construção de edifícios até aos inícios do séc. XX. Até essa data, as edificações baseavam-se em técnicas e sistemas de construção que utilizavam um diminuto número de materiais havendo, contudo, um elevado conhecimento destes materiais (como a pedra, a madeira, a cal e o vidro), bem como mestres construtores com perícia e experiência, que permitiam uma conceção adequada do edifício [14].

O edifício tradicional da cidade do Porto é a casa burguesa, que se define-se construtivamente em diversos tipos, dependendo da época. Cronologicamente são considerados:

- Porto Mercantilista – Este período apresenta-se vincado nos edifícios das áreas mais antigas da cidade, tal como a Ribeira-Barredo e a Sé. As edificações deste período apresentam uma única frente aberta para a rua e, geralmente, 2 ou 3 pisos de habitação, sendo que o piso térreo era utilizado para serviços (lojas, oficinas, etc.) [15]. A caixa de escadas era disposta transversalmente junto à parede posterior (do lado contrário da rua), podendo ser colocada ao centro do edifício nos casos em que estes possuíam duas frentes para a rua;
- Porto Iluminista - Este período surge desde a segunda metade do séc. XVIII até ao séc. XIX e apresenta-se vincado nos edifícios das áreas de Miragaia e dos quarteirões compactos da Sé e da Vitória. Caracteriza-se pelo aumento da área associado ao aumento da população [15]. Apesar de diversas mudanças relativas a elementos arquitetónicos, as características mantiveram-se semelhantes às do período anterior.
- Porto Liberal – Este período surge na segunda metade do séc. XIX e coincide com a expansão urbana para fora dos limites da muralha. Caracteriza-se pelo rompimento com a conceção da habitação anterior, fazendo com que a sua função passe a ser unicamente residencial [15]. O piso térreo passa a não existir, dando lugar a uma cave semi-enterrada em conjunto com um rés-do-chão semi-elevado [16].

Após a caracterização geral da casa burguesa do Porto, faz-se seguidamente uma caracterização dos diversos elementos construtivos de uma edificação tradicional portuense.

2.2.2. PAREDES EXTERIORES

As paredes exteriores que compõem os edifícios do Centro Histórico do Porto assentam em dois grandes grupos que se distinguem pelo material de construção: paredes em alvenaria de pedra de granito e paredes em tabique. De seguida, é feita a descrição dessas mesmas paredes, tendo em conta possíveis singularidades construtivas das edificações em estudo.

2.2.2.1. Paredes exteriores em alvenaria de pedra de granito

A construção em alvenaria de pedra no Porto pode dever-se, em certa medida, à disponibilidade desse material na região, facto que se torna importante na redução de custos e tempos de transporte à data da sua construção [17]. O sistema pode ser considerado como uma primeira forma de pré-fabricação, em que as pedras são recolhidas e transportadas para o local da implantação do edifício, podendo depois ser trabalhadas de determinada maneira dependendo do fim a que se destinam.

As paredes exteriores dos edifícios em estudo são constituídas por peças de alvenaria aparelhadas em cantaria unidas por argamassa (figura 1). Sempre com uma função estrutural neste tipo de construção, apresentam uma elevada espessura (40-60 cm) com o objetivo de criar uma força estabilizadora de compressão que equilibre as forças horizontais deslizantes e derrubantes. A elevada largura das paredes permite reduzir o risco de instabilidade por encurvadura e atuar como proteção dos agentes exteriores atmosféricos, tal como o vento e a água da chuva [17].



Figura 1 – Parede exterior em alvenaria de pedra de granito, no Porto

O revestimento interior é composto por argamassa de cal, areia e saibro, estuque (barramento de pasta de cal), posteriormente caiado ou pintado [14]. É no revestimento exterior que se nota uma maior diferença ao longo dos anos de construção em alvenaria de pedra nesta região do Norte do País, começando por apresentar uma composição muito semelhante à referida para o lado interior da parede e, a partir do séc. XVII, é utilizado um revestimento composto por uma camada fina de argamassa à base de cal, areia fina e pigmentos, com barramento de pasta de cal pintados à têmpera (tinta à base de cola) [14].

Após esse período, surgem revestimentos que se comportam como impermeabilizantes das fachadas, como o asfalto e o azulejo. Este último torna-se um ícone das fachadas da cidade do Porto devido ao seu valor estético (figura 2).

De forma geral, esta tecnologia construtiva é também utilizada nas paredes de empena.



Figura 2 – Pormenor do revestimento exterior de uma parede de fachada, no Porto

2.2.2.2. Paredes exteriores em tabique resistente

Para além da construção em alvenaria de pedra, a construção em tabique constitui uma das principais tecnologias construtivas utilizadas nos edifícios antigos do Porto, sendo importante refletir sobre a sua constituição e condições de aplicação. Quando se tratam de paredes resistentes, é possível dividir a construção em tabique misto e tabique resistente, consoante os materiais utilizados.

O sistema em tabique misto representa uma estrutura em gaiola de madeira preenchida por pedra miúda ou tijolo maciço, podendo ou não existir travamento. Neste sistema construtivo, a colocação de reboco interior dispensa de fasquiado de madeira. O sistema em tabique resistente é constituído por tábuas verticais de madeira de secção quadrangular (aproximadamente 10 cm de lado), e preenchidos por um duplo tabuado (colocado na horizontal e diagonal). É ainda colocado um fasquiado para permitir a colocação do revestimento interior (figura 3) [14].



Figura 3 – Parede em tabique, com pormenor do tabuado e fasquiado [18]

O revestimento interior deste sistema construtivo é, em geral, semelhante ao já especificado para as paredes em alvenaria de granito (subcapítulo 2.2.2.1). O revestimento exterior passa pela colocação de soletos de ardósia ou chapas de ferro onduladas.

O método menos dispendioso e a facilidade de construção deste tipo de paredes pode justificar a sua utilização. Contudo, alguns materiais utilizados, como a madeira, podem ser degradados quando colocados em contacto direto com o solo e/ou com espaços não ventilados e com elevado teor de humidade, devido a patologias de ordem biológica. Por este motivo, as paredes em tabique encontram-se, geralmente, nos pisos superiores dos edifícios [14].

Apesar da construção de paredes exteriores em tabique ter sido aqui abordada, esta não constará na análise de desempenho energético deste trabalho.

2.2.3. PAREDES DE COMPARTIMENTAÇÃO

As paredes de compartimentação ou divisórias têm um papel importante na construção tradicional, levando a cabo a interligação de paredes, pavimentos e coberturas, garantindo o travamento geral das estruturas nos edifícios antigos.

O principal sistema construtivo utilizado em paredes divisórias em Portugal é a construção em madeira ([14], [17]). Estas paredes têm uma constituição semelhante às paredes de tabique exteriores (subcapítulo 2.2.2.2), apresentando uma estrutura de madeira preenchida por tijolo maciço, cal, terra, argila ou palha, sendo revestida a cal e gesso.

2.2.4. VÃOS ENVIDRAÇADOS

Os vãos envidraçados apresentam determinadas características que os tornam importantes, tendo um forte impacto no desempenho térmico dos edifícios. É através destes elementos que se efetua o controlo da entrada de radiação solar, permitindo a regulação da temperatura interior.

Por norma, as fachadas dos edifícios históricos do Porto apresentam uma elevada concentração de vãos envidraçados e aberturas, conferindo ainda maior importância a estes elementos. De forma geral, as soluções mais comuns podem ser resumidas nas seguintes categorias:

- Vidro simples com caixilharia em madeira sem proteção;
- Vidro simples com caixilharia metálica sem proteção;
- Vidro simples com caixilharia de madeira ou metálica com portadas interiores;



Figura 4 – Exemplos de vãos envidraçados do Centro Histórico do Porto: sem proteção solar (à esquerda) e com portadas interiores de madeira (à direita) [19]

2.2.5. PAVIMENTOS

A estrutura dos pavimentos das edificações antigas em Portugal pode variar de acordo com a importância do edifício e com a localização do pavimento no mesmo. De seguida, são especificados os aspetos construtivos relativos ao património edificado corrente, sendo abordadas as soluções a nível térreo e nos restantes pisos.

A principal diferença da estrutura dos pavimentos nos edifícios em estudo reside no pavimento térreo face aos restantes, podendo resumir-se a sua constituição em terra batida e enrocamento de pedra arrumada à mão, com revestimento em lajedo de pedra [17].

Os pavimentos dos pisos superiores são realizados em madeira, designados por sobrados. Estruturalmente, este tipo de pavimentos é composto por um vigamento de troncos de madeira dispostos paralelamente e espaçados em cerca de 50-70 cm, sendo travado pela existência de um tarugamento, espaçado de 1,5 m, disposto perpendicularmente ao vigamento (figura 5).



Figura 5 – Estrutura de um pavimento de madeira definida por troncos assentes nas paredes [20]

A altura dos perfis (troncos) depende do comprimento dos vãos a vencer, ou seja, da largura das casas, sendo a ligação do vigamento com a parede de apoio realizada de modo a garantir que as vigas penetrem em cerca de dois terços da parede. Em termos de revestimento, este tipo de pavimentos apresenta, geralmente, soalhos de madeira com 2,5 a 4 cm de espessura [14].

Apesar deste elemento construtivo ter sido aqui abordado, não constará na análise de desempenho energético deste trabalho.

2.2.6. COBERTURAS

Existem diversos tipos de coberturas que podem ser distinguidas quanto à geometria, estrutura e principais materiais utilizados. De forma geral, estas podem assentar nas categorias de cobertura horizontal e cobertura inclinada, sendo que neste último caso o desvão pode ou não ser passível de ocupação.

Nos edifícios antigos em estudo, salvo raras exceções, as coberturas são inclinadas podendo ter variadas formas e constituições. Podem apresentar diferente número de vertentes (duas, três ou quatro) e inclinações, que dependem da utilização do espaço entre o teto do último piso e a cobertura.

A madeira é um material preponderante na estrutura dos telhados dos edifícios em estudo. A sua versatilidade e facilidade de manuseamento levam à criação de peças que, quando interligadas de determinada forma, permitem estabelecer estruturas que garantem uma boa coesão e segurança estrutural de forma económica [17].

O revestimento deste tipo de edifícios é, em geral, a telha cerâmica, podendo haver variações ao nível do tipo, dimensões e ligações entre telhas.

A principal solução nos edifícios em estudo é o telhado de madeira a quatro águas revestido de telha do tipo “marselha” [19] (figura 6), sendo que a solução a duas águas também é comum.



Figura 6 – Predomínio de coberturas inclinadas a quatro águas revestidas a telha cerâmica, no Porto

Para além dos aspetos mencionados, as coberturas tradicionais deste tipo de edifícios apresentam, por vezes, claraboias, que podem ser rasantes ou salientes e apresentar várias formas, sendo compostas por uma caixilharia de madeira ou metálica que suporta um vidro simples.

Este elemento construtivo não constará na análise de desempenho energético deste trabalho.

2.3. TIPIFICAÇÃO DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO

2.3.1. INTRODUÇÃO

Após terem sido apresentadas as tecnologias construtivas tradicionais dos edifícios antigos do Porto, serão abordadas as soluções de reabilitação que podem ser aplicadas na envolvente exterior dos edifícios em estudo.

Para que se possa conceber uma solução construtiva de reabilitação, não basta perceber a tecnologia construtiva que a antecede, sendo também necessário definir objetivos que se enquadrem no contexto económico, social e ambiental.

No contexto tecnológico, a reabilitação dos edifícios em estudo assenta em dois pilares essenciais:

- Garantia do cumprimento das exigências dos tempos modernos, nomeadamente quanto ao conforto (termohigrométrico e acústico) e consumo energético;
- Garantia da preservação do contexto histórico em que se insere o património edificado, evitando mudanças descontextualizadas.

Tendo por base estes princípios, a SRU (Sociedade de Reabilitação Urbana) desenvolveu um manual exigencial [19], em conjunto com a AdEPorto (Agência de Energia do Porto) e o LFC (Laboratório de Física das Construções), em que estabeleceu recomendações genéricas para uma reabilitação consciente, fundamentada e adequada à realidade atual.

Foi feita uma tentativa de obtenção de informação atualizada acerca das soluções aplicadas nos edifícios do Centro Histórico do Porto, através da SRU, sendo que tal não foi fornecida em tempo útil para a sua inclusão na presente dissertação. Deste modo, é com base no manual citado que é descrita a constituição aproximada das soluções-tipo de reabilitação da envolvente exterior.

Contudo, é necessário perceber que nenhuma solução pode ser generalizada a todos os casos, podendo depender de características específicas de cada elemento construtivo, bem como de limitações arquitetónicas, construtivas e económicas. Em cada caso, devem ser realizados estudos que permitam decidir quais as melhores soluções a aplicar, de modo a que os consumos energéticos possam ser minimizados.

Como tal, as alterações provocadas devem ir ao encontro de soluções passivas que evitem um gasto de energia excessivo.

2.3.2. PAREDES EXTERIORES

Em relação às paredes exteriores de fachada, as recomendações assentam, essencialmente, na colocação de isolamento térmico com o intuito de aumentar a resistência térmica e, assim, diminuir as perdas através dos elementos opacos. Neste contexto, é necessário definir a sua posição na estrutura da parede, bem como a sua espessura.

Analizando o contexto histórico e arquitetónico dos edifícios em estudo, percebe-se que **a colocação de isolamento na face exterior das suas fachadas é um impedimento**. Embora possa trazer vantagens para a higratérmica do edifício, como a redução de pontes térmicas e condensações internas e o aumento da inércia [21], o isolamento pelo exterior apresenta um forte impacto nestes edifícios, marcados pela beleza, arquitetura e história das suas fachadas.

As soluções-tipo para as paredes exteriores de fachadas dos edifícios em estudo passam pela colocação de isolamento térmico pelo interior, podendo este ser:

- Associado a uma forra pesada (alvenaria, elemento pré-fabricado, etc.) (A);
- Associado a um revestimento leve (gesso cartonado, madeira, derivados de madeira, etc.) (B).

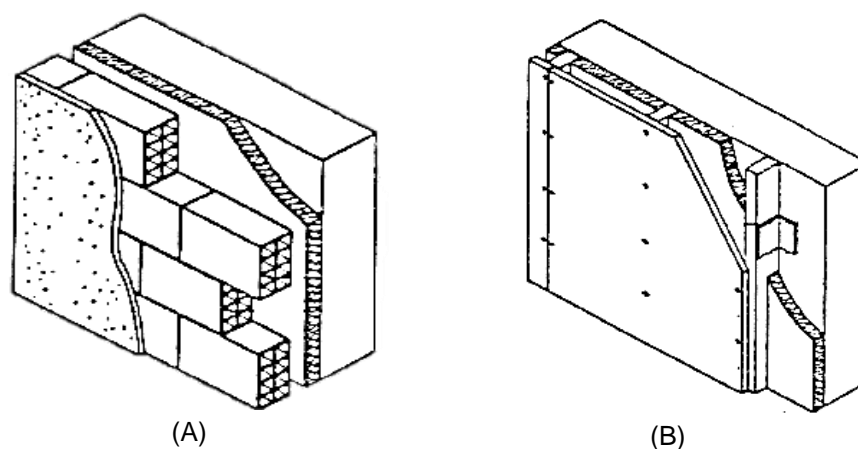


Figura 7 – Soluções comuns de reabilitação de paredes exteriores com isolamento interior (adaptada, [22])

Contudo, a solução (A) apresentada na figura 7 é de difícil aplicação em alguns casos, sendo necessária uma análise estrutural prévia.

Para além da análise da posição do isolamento, é importante refletir sobre a sua espessura. Não existindo nenhuma solução-tipo para este caso, é necessário analisar o contexto económico com o objetivo de perceber as vantagens e desvantagens da colocação de determinada espessura.

2.3.3. VÃO ENVIDRAÇADOS

Os vãos envidraçados que se encontram nos edifícios antigos apresentam, por norma, vidros simples, sendo a escolha da **substituição por vidros duplos** um aspeto comum aquando da sua reabilitação. Adicionalmente, dependendo de diversos fatores como o estado da caixilharia e das proteções solares, as modificações mais correntes são:

- Conservação da caixilharia existente (A);
- Colocação de uma segunda caixilharia interior (B);
- Substituição da caixilharia existente (C);
- Introdução de proteção solar pelo interior, em caso de inexistência de proteções (D).

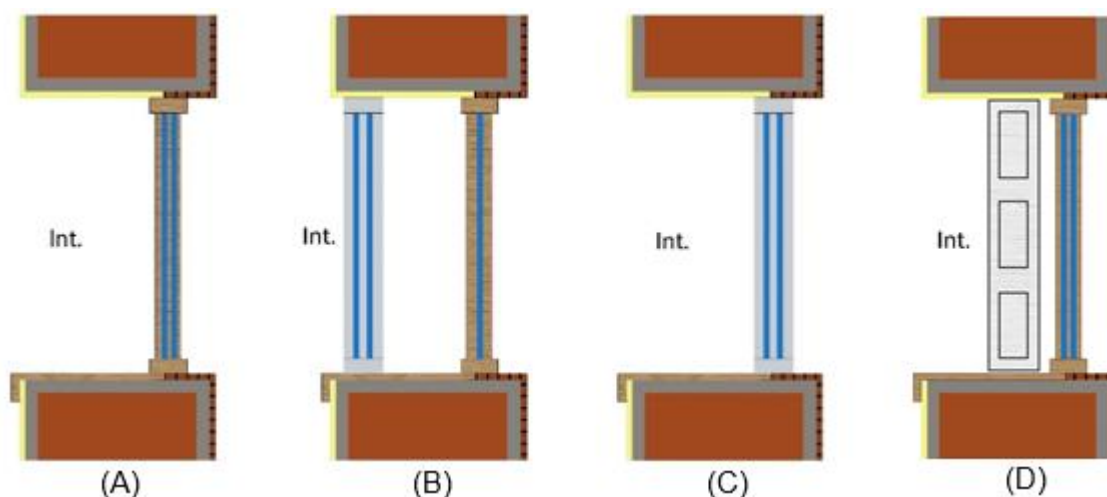


Figura 8 – Soluções comuns de reabilitação de vãos envidraçados (adaptada [19])

Deste modo, a reabilitação destes elementos permite elevar o desempenho térmico e energético das habitações, conferindo um melhor isolamento, no Inverno, e uma melhor proteção solar, no Verão.

2.3.4. PAVIMENTOS

A reabilitação energética de pavimentos torna-se importante quando estes se encontram em contacto com o exterior ou com espaços interiores não-aquecidos. Nesses casos as soluções mais comuns passam pela colocação de isolamento térmico, podendo ser colocado em diversas posições:

- Isolamento térmico inferior (A);
- Isolamento térmico superior (B);
- Isolamento térmico intermédio (C).

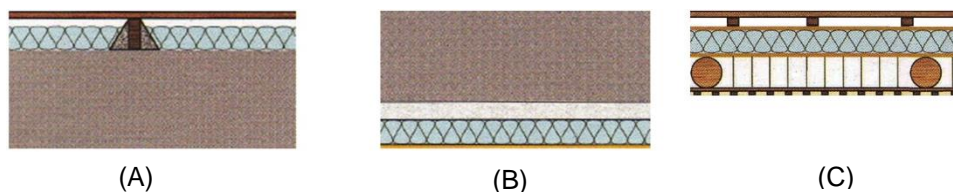


Figura 9 – Soluções comuns de reabilitação de pavimentos (adaptada, [21])

De forma geral, a solução de isolamento inferior apresenta melhores resultados ao nível da eficiência térmica. No entanto, é necessário ter em atenção as condições em que cada solução é aplicada notando, por exemplo, que a colocação de isolamento nas camadas exteriores pode reduzir o volume útil dos compartimentos onde são colocados.

2.3.5. COBERTURAS

A reabilitação das coberturas do ponto de vista térmico e energético assenta, essencialmente, na colocação de isolamento térmico ou no seu reforço. Consoante o tipo de cobertura, as soluções gerais de reabilitação são as seguintes:

- Colocação ou reforço de isolamento térmico sobre a laje da esteira, no caso do desvão da cobertura inclinada não ser passível de ocupação (A);
- Colocação ou reforço de isolamento térmico nas vertentes sobre a estrutura resistente, no caso do desvão da cobertura inclinada ser passível de ocupação (B).

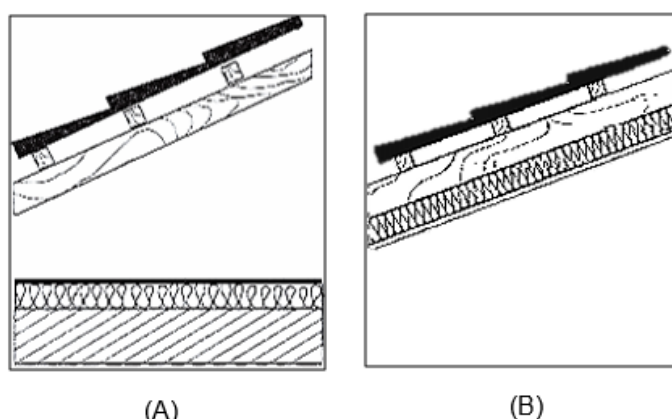


Figura 10 – Soluções comuns de reabilitação de coberturas (adaptada, [22])

As soluções apresentadas pretendem reduzir as perdas de calor que ocorrem nestes elementos construtivos, sendo que a colocação de isolamento nas coberturas é, geralmente, pouco dispendiosa, tornando-se numa das medidas mais eficientes do ponto de vista da análise custo-benefício [21].

2.3.6. VENTILAÇÃO

Aquando da reabilitação de edifícios, a componente da ventilação não deve ser menosprezada. A garantia de uma ventilação adequada pode ter um grande impacto na qualidade do ar interior, permitindo que este seja renovado regularmente e levando à diminuição da humidade relativa, o que permite evitar possíveis patologias decorrentes do excesso de humidade.

Em relação ao modo de ventilação, apesar da opção mecânica ser geralmente mais eficiente, privilegiam-se soluções passivas de **ventilação natural** por serem menos dispendiosas e ocuparem menos espaço por não necessitarem de equipamentos, como ventiladores e condutas.

Para uma ventilação natural adequada, devem ter-se em conta determinados princípios relativos à circulação do ar no interior das habitações, que permitam que o fluxo de ar se encaminhe dos compartimentos principais (quartos) para os de serviço (sala, cozinha, instalações sanitárias, etc.) e saia por efeito térmico ou pela ação do vento (figura 11).

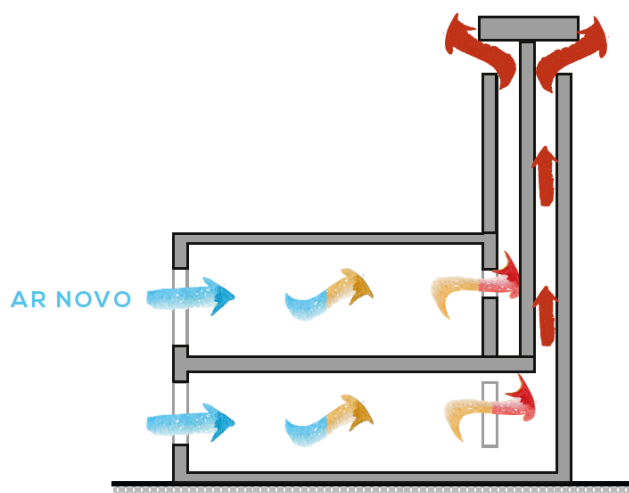


Figura 11 – Esquema de ventilação natural [23]

Para tal, deve prever-se a existência de aberturas nas paredes (grelhas ou janelas) que permitam a entrada de ar e de aberturas para extração de ar. A permeabilidade das caixilharias deve ser reduzida de modo a limitar as perdas de calor. Devem também ser garantidas, no mínimo, 0,4 renovações por hora na estação de aquecimento e 0,6 na estação de arrefecimento [24].

Por último, é de realçar o papel que os utentes podem ter no aumento da eficiência da ventilação das suas habitações, sendo crucial que estes abram as janelas para ventilação em períodos favoráveis: durante a noite, no Verão; quando a temperatura exterior for superior à interior, no Inverno. Por outro lado, se a ventilação for inadequada, durante as horas de maior temperatura no Verão e de menor temperatura no Inverno, tal pode levar a trocas de calor desnecessárias, aumentando as perdas.

2.4. SITUAÇÃO ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS EM PORTUGAL

Neste capítulo, é feita uma análise dos consumos domésticos genéricos de energia em Portugal, apresentando especial foco na parcela destinada ao aquecimento do ambiente dos edifícios.

Foi estudada a evolução dos custos energéticos para os consumidores finais, tendo como principal objetivo a compreensão do peso financeiro da componente energética referente ao aquecimento para as famílias portuguesas, consoante o seu rendimento.

No entanto, é de referir que a **análise é efetuada apenas entre 2010 e 2014** devido à falta de dados concretos dos consumos de energia, sendo possível estimar os dados mais recentes tendo por base os obtidos para anos anteriores.

2.4.1. CONSUMOS DOMÉSTICOS DE ENERGIA

Seguindo um inquérito ao consumo doméstico realizado em 2010 [25], o setor doméstico representava 17,7% do consumo final de energia, em 2009, apresentando uma taxa média de crescimento anual de 1.5% desde 1989. Posteriormente, estudos relativos a 2013, 2014 e 2015 [13, 26, 27] revelam que o consumo relativo ao setor doméstico se mantém aproximadamente constante, rondando os 17%.

Analisando mais em detalhe o mesmo documento [25] é possível retirar algumas conclusões em relação às fontes de energia mais utilizadas.

Conclui-se que, devido ao elevado número de equipamentos elétricos habitualmente presentes nas habitações, **a eletricidade é cada vez mais preponderante no setor residencial**, sendo a principal fonte de energia e correspondendo a 42,6% do consumo doméstico total, em 2010. Seguidamente, a **lenha**, com 24,2 % do consumo doméstico total, representa a segunda principal fonte de energia apresentando, contudo, quedas no consumo quando comparados com inquéritos semelhantes realizados anteriormente (60,3% em 1989 e 41,9% em 1996). Como pode ser confirmado na figura 12, o **gás natural**, o gás **GPL** (Propano, Butano e Canalizado) e o **gasóleo de aquecimento** correspondem às restantes principais fontes de energia no setor doméstico.

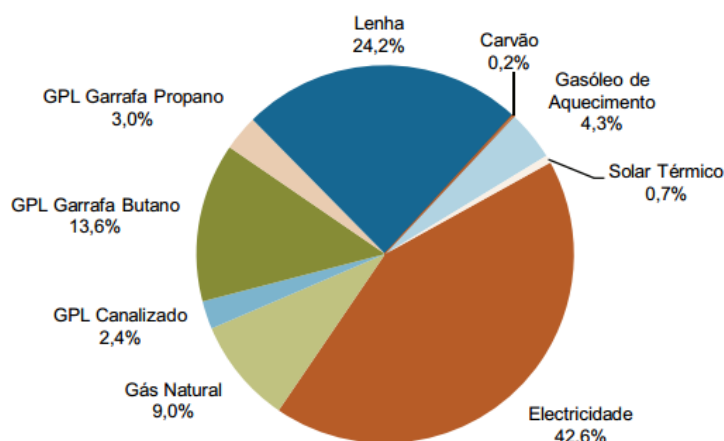


Figura 12 – Distribuição do consumo final de energia no setor doméstico, por fonte de energia [25]

À data de 2010, existiam 3 932 010 alojamentos consumidores de energia (isto é, com residência habitual). Considerando que este número não se alterou significativamente desde então, realizou-se uma análise aos consumos energéticos para cada fonte de energia indicada. Para tal, é apresentada na tabela 1 a porção dos alojamentos coberta por cada tipo de fonte.

Tabela 1 – Porção dos alojamentos coberta por cada fonte de energia [25]

Utilização de fonte de energia em alojamentos (%)				
Lenha	Eletricidade	Gasóleo Aquecimento	GPL Butano	Gás Natural
40	99,9	3,6	56	20

Tendo em conta os dados obtidos, é possível caracterizar os consumos energéticos pretendidos, apresentada na tabela 2 existindo, contudo, falta de informação para algumas fontes de energia.

Tabela 2 – Consumo anual doméstico, por fonte de energia e alojamento de residência habitual [13, 26-29]

		Consumo anual doméstico, por alojamento e fonte de energia				
		Período de referência dos dados				
	Unidade	2010	2011	2012	2013	2014
Eletricidade	kWh/Aloj.	3677,0	3502,0	3283,8	3134,4	3031,7
Gás Natural	kWh/Aloj.	3926,0	4106,1	4122,0	3931,2	4208,2
Lenha	Kg/Aloj.	1777,6	-	-	1938,9	1930,9
GPL Butano	Kg/Aloj.	163,4	-	-	186,7	169,2
Gasóleo	L/Aloj.	1027,3	-	-	-	-

Para o ano de 2010, foram adotados os valores do inquérito ao consumo doméstico. Relativamente aos anos seguintes, os consumos de eletricidade e gás natural foram obtidos diretamente do *website* do Instituto Nacional de Estatística (INE) e da PORDATA [29, 30]. No sentido de realizar uma análise aos gastos energéticos, foi necessário converter a energia consumida de gás natural de metros cúbicos (m³) para quilowatt-hora (kWh), considerando o fator multiplicativo de 11,453229 utilizado nas faturas energéticas.

Em relação à lenha e ao GPL butano, os consumos são retirados de documentos da Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) sendo estes apenas relativos a 2013 e 2014 [13, 27]. Neste caso, a conversão efetua-se de toneladas equivalentes a petróleo (tep) para quilogramas (kg), consoante o fator de conversão utilizado no inquérito de 2010, ou seja, 0,251852663 para lenha e 1,09869886 para o GPL.

Por último, o gasóleo de aquecimento é apenas analisado tendo em conta os dados do inquérito referido, tendo sido efetuada a conversão de toneladas equivalentes a petróleo (tep) para milhares de litros (10³ L) utilizando o fator 0,8516467.

Analisando os dados obtidos, nota-se um ligeiro decréscimo do consumo de eletricidade, sendo que as restantes fontes se mantêm aproximadamente constantes, com o gás natural a apresentar um maior consumo por alojamento. Porém, tanto o gás natural como o gasóleo de aquecimento representam uma pequena porção dos alojamentos em Portugal quando comparados com as restantes fontes (tabela 1), pelo que apresentam um menor impacto na análise por alojamento.

2.4.2. CONSUMOS DOMÉSTICOS DE ENERGIA PARA AQUECIMENTO DO AMBIENTE

Neste capítulo conferiu-se particular importância à energia que se destina ao aquecimento do ambiente das habitações.

Para estimar essa parcela, considerou-se como consumo doméstico total a soma das partes relativas ao consumo doméstico de todas as fontes previamente referidas, uma vez que representam a quase totalidade do consumo final de energia no setor doméstico (93,7% - figura 12) [25].

As fontes de energia referidas representavam também, em 2010, as principais parcelas no consumo total para aquecimento do ambiente, como demonstra a figura 13.

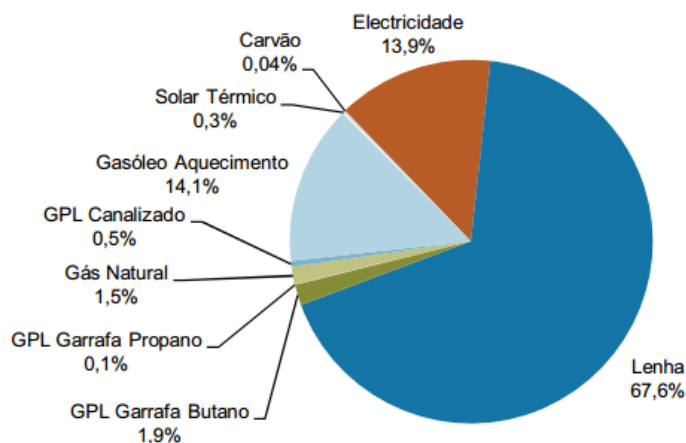


Figura 13 – Distribuição do consumo de energia para aquecimento do ambiente, por fonte de energia [25]

De seguida, e recorrendo novamente ao inquérito ao setor doméstico realizado em 2010 [25], é possível obter a tabela 3, que fornece dados sobre a porção de energia destinada ao aquecimento do ambiente para cada fonte.

Tabela 3 – Porção de energia consumida por fonte, para aquecimento do ambiente [25]

Consumo de energia, por fonte, destinada ao aquecimento do ambiente (%)				
Lenha	Electricidade	Gasóleo Aquecimento	GPL Butano	Gás Natural
52,0	9,1	60,5	2,5	3,1

Conclui-se que, por exemplo, apenas 9,1% da energia elétrica consumida se destina ao aquecimento do ambiente. Por falta de mais informação, considerou-se que os valores apresentados não se alteraram significativamente nos últimos anos.

Prosseguindo a análise, as percentagens obtidas na tabela anterior são aplicadas aos valores da tabela 2 com o intuito de serem obtidos os valores de consumo de energia para aquecimento relativos a cada fonte de energia considerada. Deste modo, foi obtida a tabela 4.

Tabela 4 – Consumo anual doméstico em aquecimento do ambiente, por alojamento e fonte de energia, entre 2011 e 2014

Consumo anual doméstico em aquecimento do ambiente, por alojamento e fonte de energia						
Período de referência dos dados						
	Unidade	2010	2011	2012	2013	2014
Electricidade	kWh	333,1	317,3	297,5	284,0	274,7
Gás Natural	kWh	122,6	128,3	128,8	122,8	131,4
Lenha	Kg	924,0	-	-	1007,8	1003,6
GPL Butano	Kg	4,2	-	-	4,8	4,3
Gasóleo	L	621,8	-	-	-	-

Analisando a tabela, constata-se um maior consumo de lenha e gasóleo no aquecimento das habitações portuguesas. Com o objetivo de estimar os gastos médios anuais de aquecimento, são seguidamente analisados os preços praticados para cada fonte considerada.

2.4.3. PREÇO DA ENERGIA

Foi realizada uma análise à evolução do preço de energia a clientes do setor residencial, em Portugal, entre 2010 e 2014. No seguimento da análise aos consumos de energia, é feito o levantamento de dados sobre os preços para as mesmas fontes consideradas anteriormente.

Foram primeiramente abordadas as tarifas de eletricidade e gás natural, sendo consultadas informações disponíveis no *website* da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE).

Relativamente à **eletricidade** [31-35], são consideradas as tarifas simples em BTN (Baixa Tensão Normal), sendo que os preços não variam ao longo do dia, procurando assim obter uma tarifa de valor médio.

Em relação ao **gás natural** [36-40], são consideradas as tarifas de escalão 2 que se encontram associadas a um consumo real anual entre 221 e 500 m³ (ou seja, aproximadamente entre 2500 a 5700 kWh/ano). Além disso, importa ainda referir que se optou pelas tarifas do fornecedor da cidade do Porto, a EDP Gás.

Prosseguindo, os preços relativos ao **gás butano** e ao **gasóleo de aquecimento** são diretamente obtidos de documentos anuais da DGEG disponibilizados no *website* Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN) [13, 26, 27]. O preço da **lenha** foi retirado do inquérito ao consumo doméstico de 2010, assumindo que este valor não variou nos anos seguintes.

Na tabela 5, apresentam-se os preços unitários de energia consoante a fonte, sendo denotado um aumento generalizado ao longo dos anos analisados.

Tabela 5 – Preços de energia entre 2010 e 2014, por fonte de energia [13, 25-27, 31-40]

		Preços de Energia, por fonte de energia				
		Período de referência de dados				
	Unidade	2010	2011	2012	2013	2014
Eletricidade	(€/kWh)	0,1285	0,1326	0,1393	0,1405	0,1528
Gás Natural	(€/kWh)	0,0545	0,0572	0,0595	0,0642	0,0620
Gás butano	(€/Kg)	1,5836	1,8400	1,8840	1,9560	1,8470
Gasóleo aquecimento	(€/L)	0,7195	1,0560	1,2930	1,2870	1,2470
Lenha	(€/kg)	0,0406	-	-	-	-

2.4.4. SALÁRIOS EM PORTUGAL

Neste capítulo, foi abordada a temática relativa à remuneração média das famílias em Portugal, com o objetivo de analisar as suas possibilidades económicas face aos gastos energéticos dos edifícios.

Para tal, estudou-se, em primeiro lugar, a evolução do salário mínimo nacional nos últimos anos (figura 14). Com bases nos dados obtidos, é perceptível que, após um longo período sem mudanças na remuneração mínima, existiu um aumento em anos consecutivos, a partir de 2015, até ao valor atual que ronda os 557 € mensais.

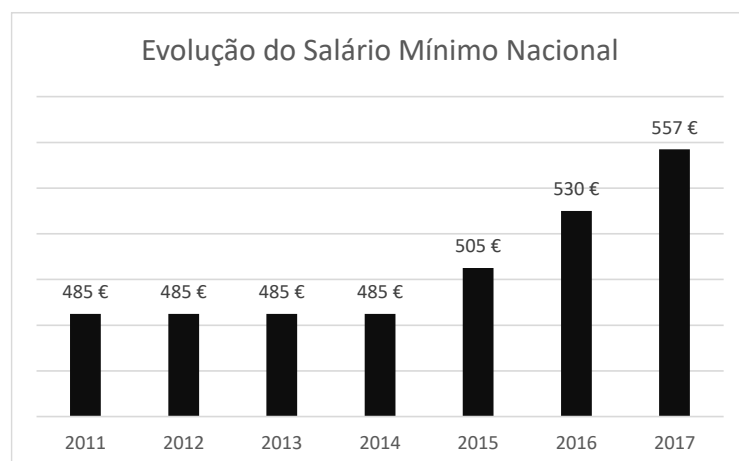


Figura 14 – Evolução do salário mínimo nacional entre 2011 e 2017, em Portugal [41]

Seguidamente, e devido à falta de dados concretos, foram estimados os rendimentos médios de diversas classes de famílias portuguesas, sendo, para futuras análises considerados cinco escalões de famílias com base nos seus rendimentos, sendo que o primeiro escalão corresponde ao salário mínimo nacional, o segundo corresponde a duas vezes esse valor, o terceiro corresponde a três vezes esse valor e assim sucessivamente.

Tabela 6 – Rendimentos médios mensais e anuais de famílias em Portugal, por escalões

	Salário mensal €	Salário anual €
Escalão 1	557	6684
Escalão 2	1114	13368
Escalão 3	1671	20052
Escalão 4	2228	26736
Escalão 5	2785	33420

2.4.5. ANÁLISE CRÍTICA DO ESFORÇO FINANCEIRO PARA AQUECIMENTO DO AMBIENTE

Finalizando o estudo do panorama energético recente em Portugal, torna-se relevante analisar as despesas médias atuais com energia, em especial da parcela para o aquecimento das habitações, bem como o esforço financeiro das famílias portuguesas face aos seus gastos.

Deste modo, foram primeiramente calculadas as despesas anuais com energia por habitação de residência habitual, considerando as fontes de energia anteriormente referidas. Efetuou-se o cálculo considerando os consumos e preços de energia apresentados previamente.

Tabela 7 – Gastos anuais médios de energia em Portugal por alojamento e fonte, entre 2010 e 2014

Gastos anuais médios de energia, por alojamento e fonte de energia					
	€				
	2010	2011	2012	2013	2014
Eletricidade	472	464	457	440	463
Gás Natural	214	235	245	252	261
Lenha	72	-	-	79	78
GPL Butano	259	-	-	365	313
Gasóleo	739	-	-	-	-

De seguida, e recorrendo novamente aos dados da tabela 3, foi possível estimar os gastos anuais médios das famílias portuguesas para aquecimento do ambiente das suas habitações (tabela 8).

Tabela 8 – Gastos anuais médios com energia para aquecimento do ambiente em Portugal por fonte de energia, entre 2010 e 2014

Consumo anual médio de energia para aquecimento, por fonte de energia					
	€				
	2010	2011	2012	2013	2014
Eletricidade	43	42	41	40	42
Gás Natural	7	7	8	8	8
Lenha	38	-	-	41	41
GPL Butano	7	-	-	9	8
Gasóleo	447	-	-	-	-
Aquecimento					

Face aos dados apresentados, é possível notar que as famílias portuguesas praticamente não investem no aquecimento do ambiente das suas casas. Relativamente à aparente elevada despesa de gasóleo de aquecimento, pode argumentar-se que o número de alojamentos que dispõem desta fonte de energia é muito baixo. É também de realçar que os alojamentos não dispõem de todas as fontes de energia.

A falta de aquecimento nas habitações portuguesas pode ser justificada através de um conjunto de fatores:

- Em primeiro lugar, os salários em Portugal, apesar dos recentes aumentos no escalão mais baixo, permanecem bastante reduzidos e não conferem aos portugueses grandes possibilidades para aquecer as suas habitações;
- Em segundo lugar, os elevados preços de energia, nomeadamente da eletricidade, bem como os seus constantes aumentos levam a despesas elevadas com energia, incitando à poupança;
- Por último, o clima moderado em Portugal leva a que, durante grande parte do ano, o aquecimento das habitações se torne dispensável.

A falta de motivação para as famílias portuguesas aquecerem as suas habitações significa que o conforto térmico pode não ser garantido de forma constante ao longo do ano.

Seguindo essa linha de raciocínio, o âmbito desta dissertação vai de encontro ao estudo da melhoria de soluções passivas de eficiência energética que, através da reabilitação, possam conferir um determinado nível de conforto ao interior dos edifícios do Centro Histórico do Porto.

2.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi abordada a temática da reabilitação dos edifícios antigos do Centro Histórico do Porto. Como tal, procurou-se estudar esses edifícios para que, através da sua reabilitação, se pudessem procurar soluções para reduzir o seu consumo energético.

Numa primeira abordagem, foi feita uma breve descrição da casa burguesa tradicional do Porto, sendo distinguidas três principais épocas marcadas, essencialmente, por mudanças arquitetónicas e pelo diferente uso dado ao piso térreo, sendo primeiro utilizado como loja e, numa fase posterior, como residência.

Após uma descrição geral do edifício-tipo foram detalhadas as soluções construtivas mais comuns. As principais características dos elementos tratados são apresentadas em seguida:

- Paredes exteriores de grande espessura (40 a 60 cm) em alvenaria de pedra de granito sem isolamento térmico;
- Por vezes, as paredes exteriores eram construídas em tabique, nos pisos superiores;
- Revestimentos das paredes eram à base de cal e estuque, sendo o azulejo o elemento mais icónico devido ao seu valor estético;
- Vãos envidraçados com caixilharia em madeira e vidro simples, podendo ou não apresentar proteção solar;
- A principal estrutura dos pavimentos e coberturas era feita em madeira.

Posteriormente, foram apresentadas as principais soluções de reabilitação aplicadas na zona dos edifícios em estudo, que se encontram resumidas seguidamente:

- Colocação de isolamento pelo interior nas paredes exteriores, geralmente lã mineral associada a gesso cartonado;
- Substituição de vidros simples por vidros duplos e renovação das caixilharias;
- Introdução de proteções solares, se inexistentes;
- Colocação de isolamento térmico nas coberturas: sobre a laje da esteira, no caso do desvão da cobertura inclinada não ser passível de ocupação; nas vertentes sobre a estrutura resistente, no caso do desvão da cobertura inclinada ser passível de ocupação;
- Ventilação natural adequada relativamente à admissão, passagem e evacuação de ar.

Por último, foram analisados os consumos energéticos das habitações portuguesas, considerando as principais fontes de energia utilizadas. Da mesma forma, foi feito um levantamento dos preços de energia praticados em anos recentes. Nesta fase, foram focados os consumos de energia para aquecimento e calculados os gastos médios anuais. Assim, comparando estes gastos com os salários médios em Portugal, conclui-se que as famílias portuguesas despendem muito pouco dinheiro para aquecer as suas habitações.

3

METODOLOGIA

3.1. OBJETIVO

Como abordado anteriormente, as temáticas de poupança e eficiência energética apresentam um papel cada vez mais importante na sociedade atual. É nessa perspetiva que se pretende estudar a influência da melhoria das soluções da envolvente dos edifícios (paredes exteriores, vãos envidraçados, proteções solares e ventilação), através de ações de reabilitação, considerando o benefício para a obtenção do melhor desempenho térmico e energético.

Apesar de ter sido concluído, no subcapítulo 2.4.5, que a maioria dos portugueses não investe no aquecimento das suas habitações, é importante estudar as necessidades de energia dos edifícios para atingir as condições de conforto, utilizando a simulação higrotérmica avançada.

Em primeiro lugar, porque os programas de simulação avançada têm a vantagem de calcular em regime dinâmico, distinguindo-se dos regulamentos existentes relativos ao desempenho energético (REH) e à certificação energética dos edifícios (SCE) que, apesar de também considerarem nos cálculos o aquecimento contínuo das habitações (24h), calculam em regime permanente. Em segundo lugar, a utilização da simulação avançada para analisar o clima interior de habitações possibilita a realização de análises técnico-económicas que permitem otimizar as soluções a aplicar em cada caso.

Neste capítulo, demonstram-se os procedimentos seguidos no decorrer das análises efetuadas, tendo como objetivo final a quantificação das necessidades de aquecimento e arrefecimento para diferentes cenários, que são igualmente descritos.

Para tal, são efetuadas diversas simulações com o auxílio de *software* informático que permite realizar análises higrotérmicas avançadas. Tais simulações são realizadas utilizando um modelo que tem por base um edifício antigo do Centro Histórico do Porto, que apresenta características representativas do edifício-tipo dessa zona da cidade, caracterizado no capítulo 2.

3.2. WUFI®PLUS - MODELOS DE SIMULAÇÃO

3.2.1. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

De entre múltiplas escolhas de programas semelhantes que efetuam análises de simulação higrótérmica avançada, foi escolhido o *software* WUFI®Plus. Este programa permite, com facilidade, obter resultados das transferências de calor e humidade, bem como de consumos energéticos.

Observando a interface do programa na figura 15, é possível ter uma perspetiva geral das suas funcionalidades.

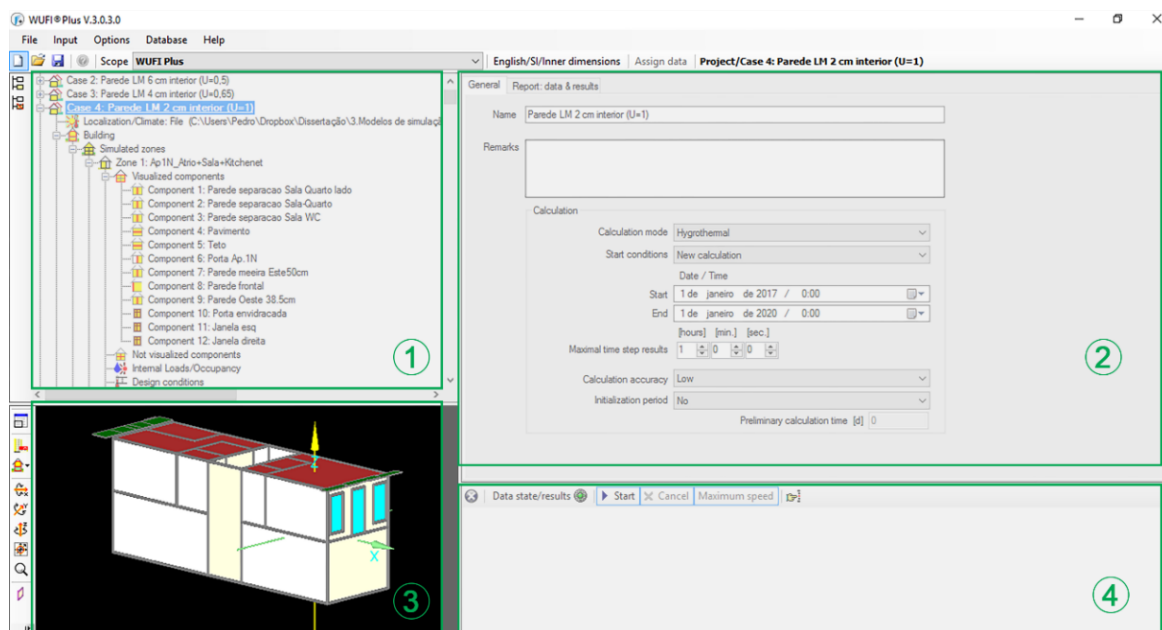


Figura 15 – Interface geral do programa de simulação

O campo (1) representa a árvore de projeto, onde é possível criar vários cenários de simulação e introduzir os dados. O campo (2) simboliza a caixa de diálogo e depende das seleções da árvore de projeto. No campo (3), pode observar-se a geometria do modelo e selecionar as zonas e componentes desejados. Por último, no campo (4) podem ser detetados os dados de introdução em falta, assim como observar o progresso de cada simulação.

A introdução de dados revela-se como um dos mais importantes passos pois condiciona todos os posteriores, pelo que esta fase necessita de um elevado grau de atenção e fundamentação.

Neste campo, o programa apresenta uma vasta gama de opções e variáveis, listadas seguidamente:

- Possibilidade de construção geométrica do modelo, efetuando uma divisão por zonas;
- Possibilidade de mudança da orientação, de 0° a 360°;
- Definição do clima exterior;
- Base de dados de materiais (sendo possível adicionar outros materiais);
- Possibilidade de criação de assemblagens a serem atribuídas a cada elemento construtivo (paredes, pavimentos e coberturas);
- Definição de perfis de condições de utilização, ventilação e climatização;
- Definição do período de simulação.

Após essa fase estar completa a simulação pode ser iniciada. Os fenómenos de transporte de calor e humidade são calculados em conjunto, utilizando métodos de elementos finitos. Ao longo de todo o período de simulação, pode ser observada a evolução dos perfis de temperatura e humidade relativa interior, através de um filme, tanto para cada zona definida como para cada componente.

Depois de cada simulação, o programa apresenta diversos tipos de resultados para cada zona. Estes são expostos em gráficos ou em tabelas e representam parâmetros relativos ao clima interior (temperatura, humidade e ventilação), ao conforto e à energia (consumos).

Paralelamente, são impressas diversas folhas de resultados que apresentam, primeiramente, um quadro-resumo que expõe parâmetros importantes, como as necessidades de energia útil, seguido de um balanço energético por zona definida, diferenciando a origem dos ganhos ou perdas (ventilação, ganhos solares, parte opaca, parte envidraçada, etc.). Ainda na mesma impressão, são apresentados os ganhos e perdas de calor (em kWh) através de cada elemento. Adicionalmente, a totalidade dos dados obtidos pode ser exportada para um ficheiro Excel™, podendo assim ser manipulados mais livremente.

Na figura 16, apresenta-se um quadro-resumo dos parâmetros a introduzir em cada simulação e dos resultados que se podem obter.

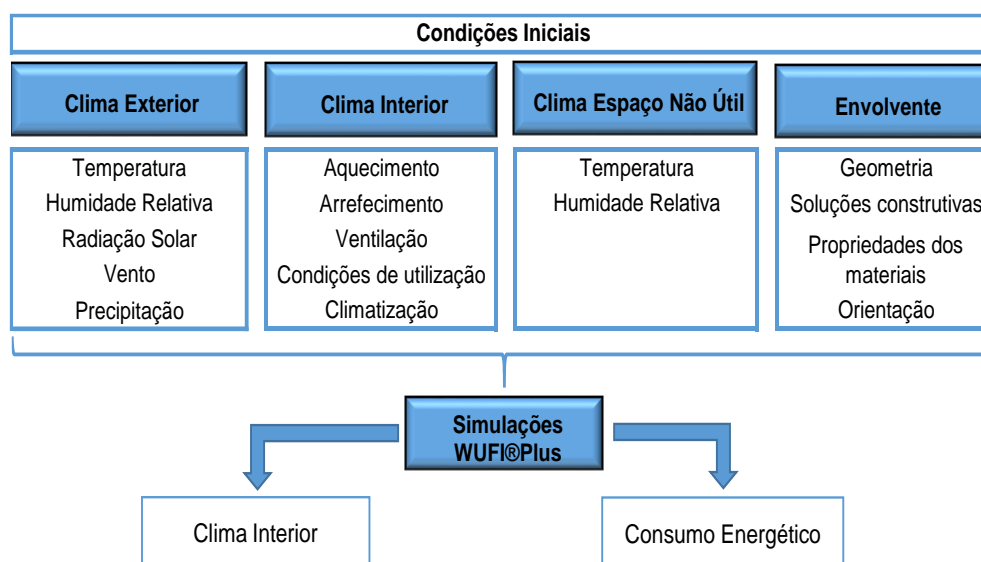


Figura 16 – Quadro-resumo das potencialidades do programa utilizado (adaptada, [42])

3.2.2. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Aquando de uma simulação, o programa realiza os cálculos dos processos de transporte de humidade e de calor através dos diversos componentes introduzidos no modelo. O clima interior de um determinado espaço é simulado com base num processo iterativo de discretização de equações que traduzem os fenómenos de transporte mencionados, tendo em conta os dados introduzidos. Contudo, é importante referir que nesta dissertação apenas são analisados os dados relativos à temperatura interior.

Neste caso, procura-se obter um perfil da temperatura interior que se mantenha na gama de conforto térmico ao longo de todo o ano. Para tal, considera-se que todas as zonas simuladas estão permanentemente aquecidas ou arrefecidas, isto é, os sistemas de aquecimento ou de arrefecimento funcionam sempre que a temperatura interior se mantiver fora dos valores limite.

Foi considerada uma gama de temperaturas de conforto térmico entre os 20°C e os 25°C. Estes valores têm por base o anterior regulamento português da térmica de edifícios (RCCTE [5]), sendo também bastante próximos da gama de conforto relativa à categoria II (edifícios novos ou reabilitados) da norma europeia de conforto adaptativo (EN 15251[43]). A escolha dos valores da regulamentação anterior pode ser justificada por traduzir as condições ideais de conforto, que são mais exigentes que a regulamentação em vigor. Todavia, no presente trabalho não se pretende efetuar qualquer comparação, nem com a regulamentação portuguesa nem com a norma citada.

Na figura 17 é apresentado um perfil anual genérico de temperatura em flutuação livre, indicando a gama de conforto térmico definida.

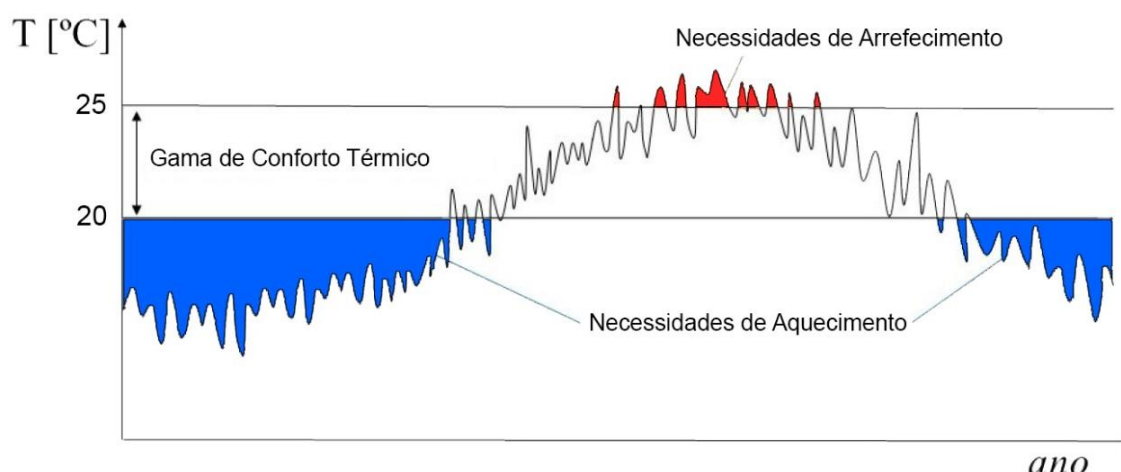


Figura 17 – Representação das necessidades de energia útil (adaptada, [42])

Deste modo, as necessidades de energia útil (arrefecimento e aquecimento) podem ser calculadas através da quantificação da energia necessária para compensar as diferenças entre as temperaturas de conforto e a flutuação livre da temperatura.

Numa fase posterior, serão estudados diversos cenários de simulação, procurando obter as soluções ótimas que minimizem as necessidades de energia referidas.

3.3. DESCRIÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO

Neste capítulo descreve-se o modelo geométrico utilizado nas simulações higrótérmicas, que se baseia num edifício existente representativo dos edifícios em estudo.

O modelo foi desenvolvido no âmbito de uma tese de doutoramento a decorrer em paralelo ao presente trabalho, na Faculdade de Engenharia do Porto (FEUP), pelo que se torna importante referir que a grande maioria das informações a seguir relatadas é retirada desse estudo [42].

3.3.1. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO EM ESTUDO

O edifício que serviu de base para a realização do modelo de simulação localiza-se no Centro Histórico do Porto e apresenta características semelhantes à casa tradicional do Porto, descrita no subcapítulo 2.2.1. É orientado a Norte e Sul e tem 4 pisos, sendo que cada um deles apresenta 2 apartamentos, existindo ainda uma caixa de escadas na parte central do edifício. Na figura 18 observa-se a geometria dos alçados frontais e tardoz.



Figura 18 – Alçado principal (à esquerda) e tardoz (à direita) do edifício em estudo [42]

Apesar de o edifício já ter sido alvo de uma ação de reabilitação, as suas soluções construtivas foram maioritariamente mantidas. As paredes de fachada principal e tardoz são constituídas por alvenaria de pedra de granito com revestimentos em azulejo cerâmico e reboco pintado (ou chapa ondulada), respetivamente. O edifício apresenta também paredes interiores de compartimentação realizadas em tabique, pavimentos de madeira e caixilharias em madeira com portadas interiores de cor clara.

Na figura 19, é apresentado o piso 1 do edifício-tipo em estudo que foi objeto de modelação.

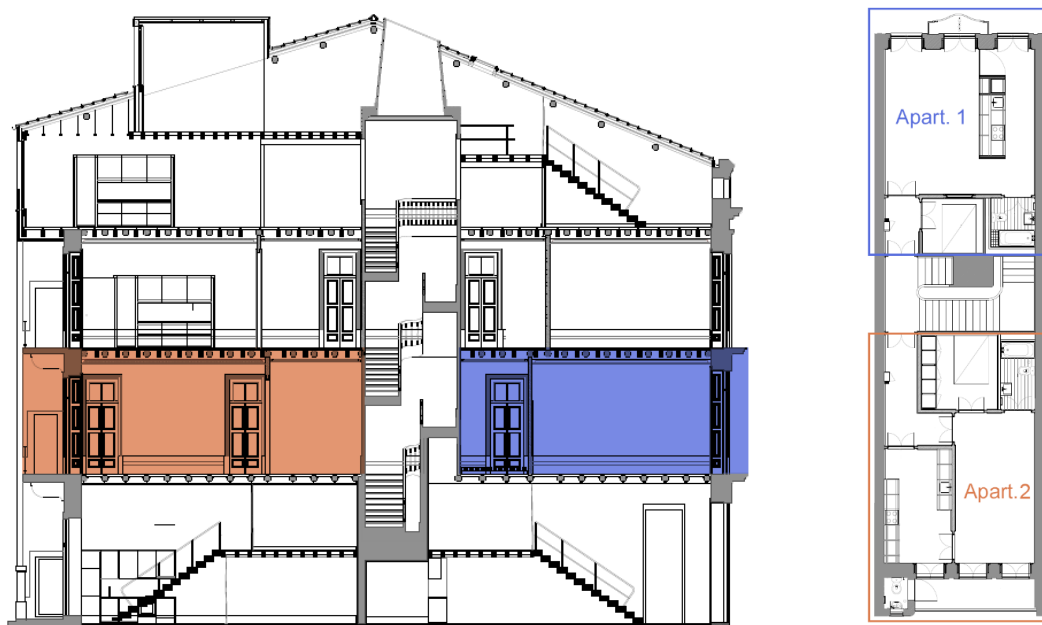


Figura 19 – Corte (à esquerda) e planta (à direita) da zona modelada do edifício em estudo

Neste piso podem destacar-se dois apartamentos separados pela caixa de escadas. A tabela 9 apresenta a composição de cada apartamento tendo em conta as suas divisões, bem como as respetivas áreas de pavimento e respetivos volumes.

Tabela 9 – Compartimentos dos apartamentos presentes no modelo geométrico e respetivas áreas de pavimento e volumes

Apartamento 1	Área (m ²)	Volume (m ³)	Apartamento 2	Área (m ²)	Volume (m ³)
Sala Kit	41,60	153,50	Sala	30,50	112,55
Quarto	6,50	23,99	Cozinha	13,42	49,52
Inst. Sanitárias	4,20	15,50	Quarto	8,56	31,59
Total	52,30	192,99	Inst. Sanitárias	5,54	20,44
			Total	58,02	214,09

Cada compartimento apresentado corresponde a uma zona do modelo distinta, tendo sido escolhida **apenas uma** para efetuar a recolha e análise de resultados, representativa para as restantes. Optou-se pela zona **Sala Kit**, destacada acima a azul e correspondente à sala e *kitchenette* do apartamento 1, por ter uma área e volume consideráveis e contemplar as variantes necessárias ao estudo de sensibilidade realizado no capítulo 4, nomeadamente as paredes exteriores e os vãos envidraçados.

3.3.2. ESPECIFICAÇÕES DO MODELO TRIDIMENSIONAL

No presente capítulo evidenciam-se as características do modelo tridimensional realizado no âmbito da tese de doutoramento mencionada previamente [42].

Na figura 20 encontra-se representando o modelo geométrico do primeiro andar do edifício-tipo em estudo, criado a partir do programa de simulação WUFI®Plus.

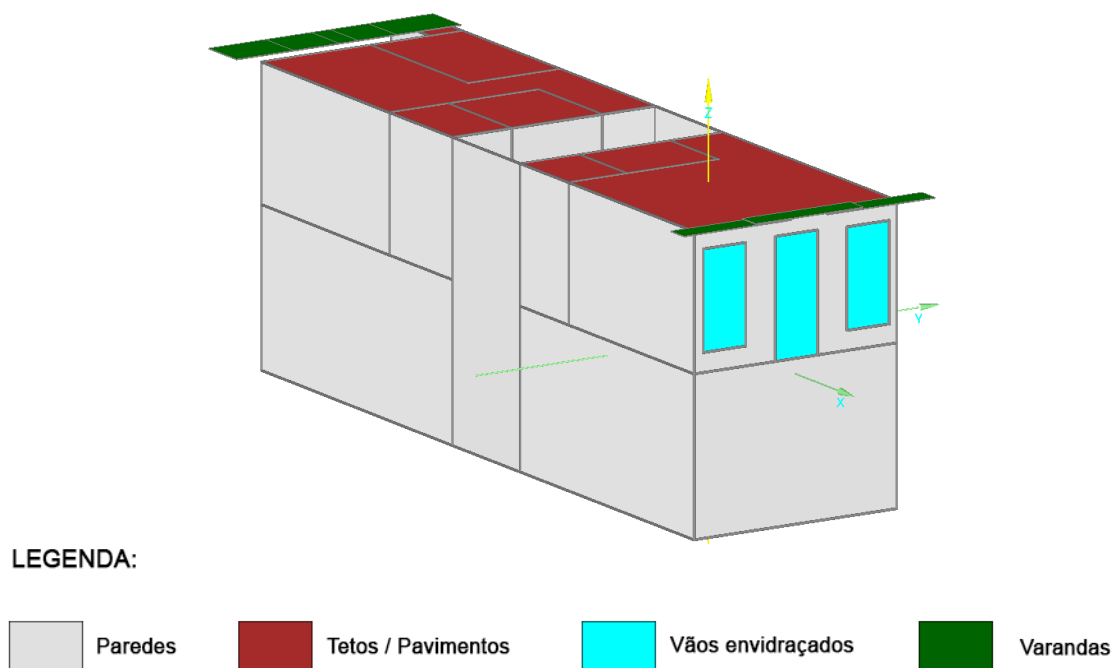


Figura 20 – Modelo tridimensional e destaque da zona de simulação

Como referido, apenas será objeto de análise uma zona do modelo que se encontra identificada na figura 21 e cujos elementos da envolvente estão descritos na tabela 10.

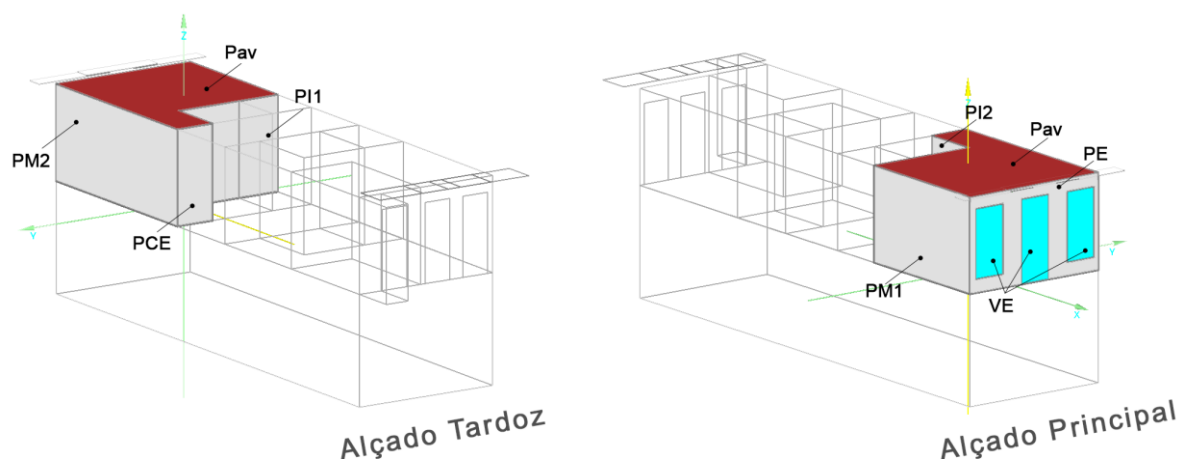


Figura 21 – Detalhe da zona em estudo e respetivos componentes

Tabela 10 – Breve descrição e características dos componentes da zona em estudo [42]

Código	Designação	Breve Descrição	U W/(m ² .°C)
PE	Parede de Fachada	Parede de alvenaria de granito (50 cm) Reboco: cal hidráulica e estuque Revestimento: azulejo	2,00
PM1	Parede Meeira	Parede de alvenaria de granito (50 cm) Reboco: cal hidráulica Revest.: Reboco Arg. e cimento c/ pintura	2,17
PM2	Parede Meeira	Parede de alvenaria de granito (38,5 cm) Reboco: cal hidráulica Revest.: Reboco Arg. e cimento c/ pintura	2,48
PI1	Parede Interior	Parede em tabique Reboco: cal hidratada c/ fibra de vidro Revestimento: estuque	1,95
PI2	Parede Interior	Parede em tabique Revestimento: estuque Revestimento: gesso cartonado/ cerâmicos	1,31
PCE	Parede Caixa Escadas	Igual a PI1	1,95
Pav	Pavimento/Teto	Pavimento de madeira Gesso cartonado/ Soalho de madeira Isol. térmico: 8 cm de Lã de rocha	0,30
VE	Vãos Envidraçados	Caixilharia de madeira Vidro duplo 4-5-6 incolor (g _L =0,75) Portadas interiores de madeira (g _T =0,35)	U _w = 2,70 (Vidro) U _{wdn} = 2,10 (Vidro + Prot.)

Dos elementos descritos, apenas a parede exterior (PE) e os vãos envidraçados (VE) serão objeto de análise no estudo de sensibilidade realizado no âmbito da presente dissertação (capítulo 4). Todos os restantes elementos permanecerão imutáveis, pelo que não será feita uma caracterização exaustiva dos mesmos.

Na figura 22 apresenta-se um corte construtivo da parede exterior (PE), bem como as propriedades dos materiais que a constituem.

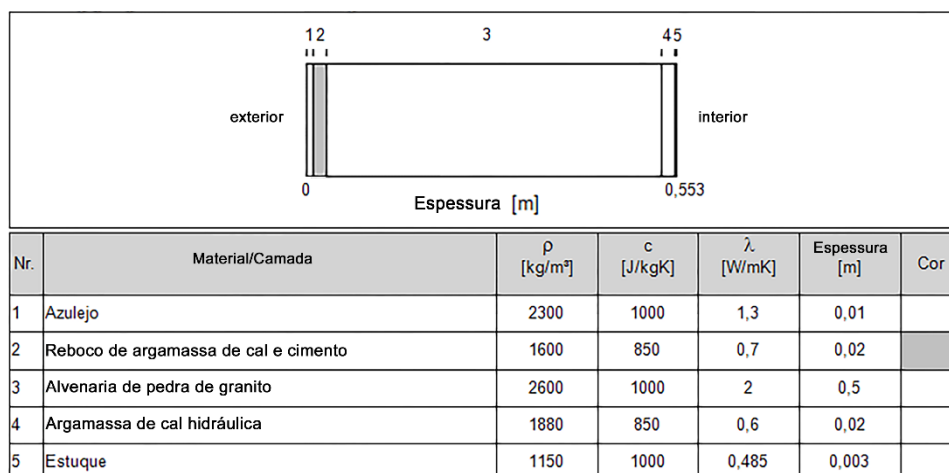


Figura 22 – Pormenor construtivo da parede exterior de fachada em estudo

Após ter sido feita a descrição da geometria do modelo utilizado, serão caracterizadas os parâmetros que definem as condições iniciais de simulação.

3.4. CONDIÇÕES INICIAIS E INTRODUÇÃO DE DADOS

3.4.1. ENVOLVENTE DA ZONA EM ESTUDO

Relativamente à zona em estudo, podem ser distinguidos três tipos de elementos: elementos em contato com o exterior, elementos em contacto com o interior e elementos em contacto com espaço não-útil (E.N.U.). A figura 23 pretende identificar a envolvente considerada.

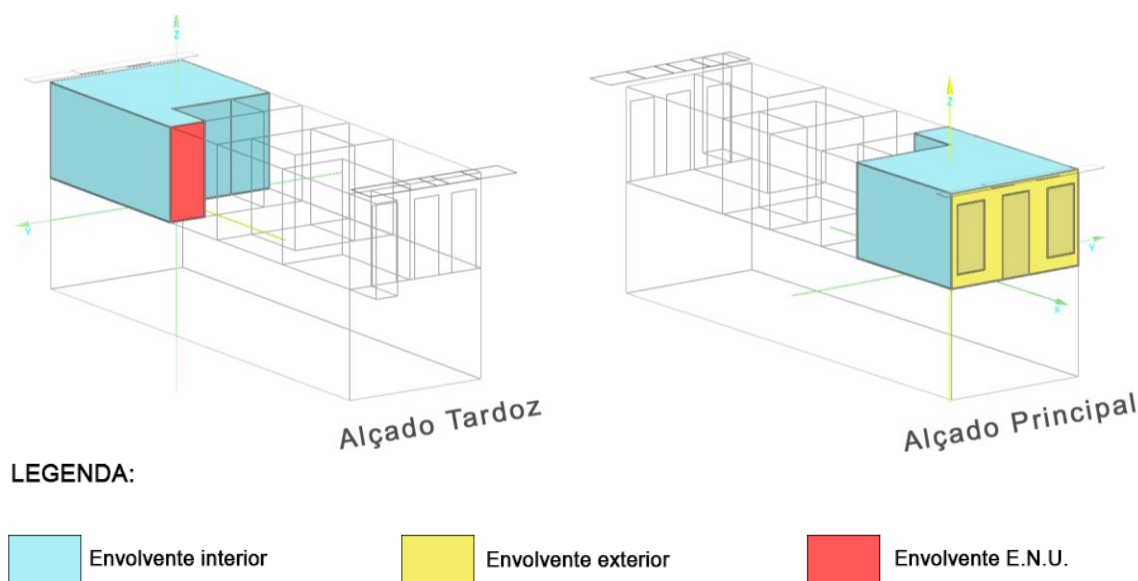


Figura 23 – Representação da envolvente da zona em estudo

A envolvente exterior é apenas composta pela fachada do edifício em contacto com o clima exterior. As paredes e os pavimentos que compõem a envolvente interior são considerados adiabáticos pois, lateralmente, o edifício encontra-se geminado e nos restantes pisos existem outros apartamentos com o mesmo clima interior. A envolvente com o espaço não útil representa o contacto com a caixa de escadas (não aquecida).

3.4.2. CLIMA EXTERIOR

Os dados climáticos podem ter uma influência significativa no desempenho energético de um edifício [44], facto que torna importante a utilização de dados válidos e fiáveis.

O programa WUFI®Plus necessita dos seguintes parâmetros climáticos:

- Temperatura Exterior (°C);
- Humidade relativa exterior (%);
- Radiação solar: global e difusa (W/m^2);
- Precipitação anual (mm);
- Direção e velocidade do vento (m/s).

Na sua base de dados, encontram-se valores de dados meteorológicos de diversas cidades mundiais relativos a anos de referência. Estes, denominados *Test Reference Years (TRY)*, são conjuntos de dados meteorológicos, obtidos para cada hora do ano, que procuram tipificar um ano de referência, com base em medições efetuadas em estações meteorológicas.

Como o programa ainda não possui dados para um ano de referência da cidade do Porto, no âmbito da presente dissertação utiliza-se um TRY construído para um artigo científico [44], com base em dados climáticos medidos entre 2009 e 2014 pela estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções (LFC), na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Na figura 24 são apresentados os dados do ficheiro climático do ano de referência introduzido no programa WUFI®Plus, representando a temperatura exterior do Porto e o seu valor médio.

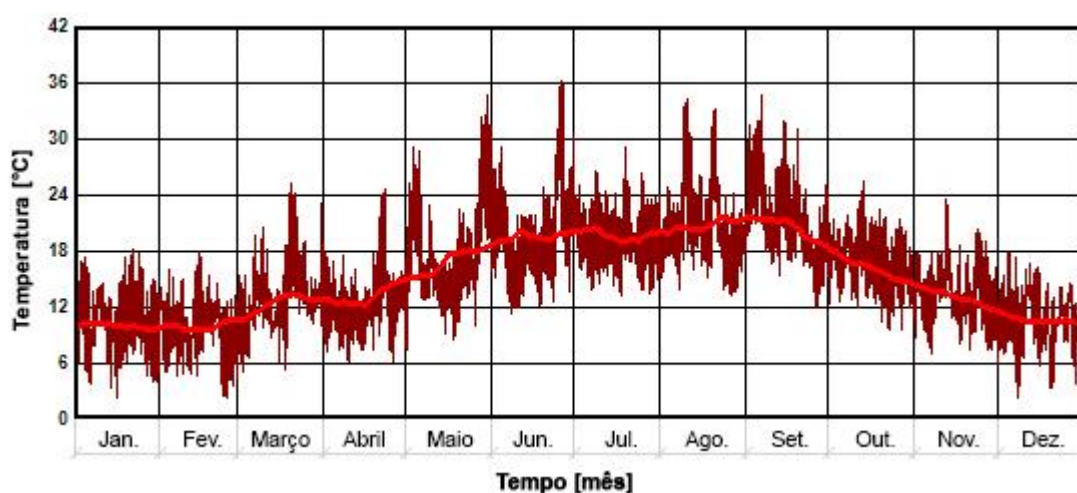


Figura 24 – Perfil de temperatura exterior utilizado no modelo de simulação

Pode observar-se que a temperatura se situa fora da zona de conforto térmico definida para a presente dissertação ($20^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$) durante praticamente todo o Inverno e parte do Verão. A linha média indica que o Verão apresenta uma temperatura bastante confortável, o que pode pressupor que as necessidades de arrefecimento das zonas interiores simuladas não serão muito elevadas. O objetivo deste trabalho

passa pelo amortecimento destes picos através de medidas de melhoria do desempenho térmico do edifício.

3.4.3. CLIMA INTERIOR

3.4.3.1. Condições de utilização

As condições de utilização de uma habitação refletem o modo como os seus habitantes a ocupam, podendo influenciar o clima interior.

O programa de simulação utilizado aborda estas condições através dos seguintes parâmetros:

- Calor convectivo e radiante (W);
- Vapor produzido (g/h);
- Produção de CO₂ (g/h);
- Atividade Humana (met – ritmo metabólico);
- Vestuário (clo);
- Velocidade do ar (m/s).

Foram considerados perfis de ocupação retirados da base de dados do programa WUFI®Plus, representando uma habitação individual. Os perfis mencionados são distintos para a semana e para o fim-de-semana.

Na tabela 11 são apresentados os perfis utilizados, sendo fixos os dados relativos ao vestuário e à velocidade do ar, com valores de 0,7 clo e 0,1 m/s, respetivamente. Foi definida uma atividade mais intensa ao final do dia, durante a semana, e também ao longo de todo o fim-de-semana, sendo os valores dos parâmetros maiores nesse período.

Tabela 11 – Condições de utilização da zona em análise

Calor Convectivo	Semana	Hora	0	6	7	8	18	22	23									
		Valor [W]	8,6	55	78,6	8,6	198,6	152	8,6									
Calor Radiante	Fim de Semana	Hora	0	8	8,5	9	11	12	12,5	15	15,5	17	18	18,5	21,5	22	22,5	23
		Valor [W]	8,6	24,2	32	76,6	55,2	55,2	78,6	78,6	140	55,2	175,2	198,6	175,2	167,6	152	8,6
Vapor Produzido	Semana	Hora	0	6	7	8	18	22	23									
		Valor [g/h]	4,3	27,5	39,3	4,3	99,3	76	4,3									
Produção de CO ₂	Fim de Semana	Hora	0	8	8,5	9	11	12	12,5	15	15,5	17	18	18,5	21,5	22	22,5	23
		Valor [g/h]	4,3	12,1	16	39,3	27,6	27,6	39,3	39,3	70	27,6	87,6	99,3	87,6	83,8	76	4,3
Atividade Humana	Semana	Hora	0	6	7	8	18	22	23									
		Valor [met]	0	1	1,2	0	1,2	1	0,8									
	Fim de Semana	Hora	0	8	8,5	9	11	12	12,5	15	15,5	17	18	18,5	21,5	22	22,5	23
		Valor [met]	0	1	1,2	1	1	1	1	1,2	1	1	1,2	1	1	1,2	0	0,8

3.4.3.2. Climatização

A climatização é definida de modo a garantir que a temperatura se mantenha na gama de conforto térmica definida anteriormente, entre os 20°C e os 25°C.

Deste modo, são considerados sistemas elétricos com uma capacidade máxima suficiente para cobrir na totalidade os gastos de energia para atingir o conforto, tendo-se introduzido no modelo dois sistemas com potência máxima de 6000 W, sendo um para aquecimento e outro para arrefecimento.

3.4.4. CLIMA DE CAIXA DE ESCADAS – ESPAÇO NÃO ÚTIL

A caixa de escadas presente no edifício em estudo representa um espaço interior não aquecido. Como tal, o seu clima é próprio e diferente do clima interior do apartamento definido anteriormente.

No âmbito de uma tese de doutoramento em curso [42], a temperatura deste espaço foi medida ao longo de um ano utilizando um *data logger*, tendo sido criado um ficheiro climático que foi introduzido no programa de simulação e que traduz o clima da caixa de escadas.

Na figura 25, mostra-se o perfil de temperatura anual considerado para a zona especificada. Apesar de apresentar algumas interrupções de registo (nos períodos assinalados a vermelho), é possível constatar que este clima se assemelha ao exterior apresentando, contudo, picos de temperatura consideravelmente menores.



Figura 25 – Perfil de temperatura da caixa de escadas utilizado no modelo de simulação [42]

3.5. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO CONSIDERADOS PARA ESTUDOS DE SENSIBILIDADE

Após terem sido descritas as características do edifício em estudo e do modelo de simulação, introduz-se, neste ponto, a metodologia utilizada no estudo de sensibilidade realizado na presente dissertação.

No âmbito desse estudo, consideraram-se alterações aos seguintes elementos:

- Paredes de fachada;
- Vãos envidraçados – vidros e proteções solares;
- Ventilação.

Seguidamente, serão descritos diversos cenários de simulação para que seja possível analisar a influência da alteração dos elementos considerados nos consumos energéticos de aquecimento e arrefecimento para obtenção do conforto térmico.

3.5.1. PAREDE DE FACHADA

A análise relativa às paredes de fachada consistiu na alteração da espessura de isolamento térmico. Como foi detalhado no subcapítulo 3.3.2, inicialmente a parede não apresentava qualquer tipo de isolamento.

Optou-se pela colocação de isolamento térmico pelo interior na parede original pois, como referido no subcapítulo 2.3.2, a importância histórica e arquitetónica das fachadas dos edifícios da baixa do Porto impede a colocação de isolamento pelo exterior. O material de isolamento escolhido foi a lã mineral, cujas características e posição são apresentadas na figura 26.

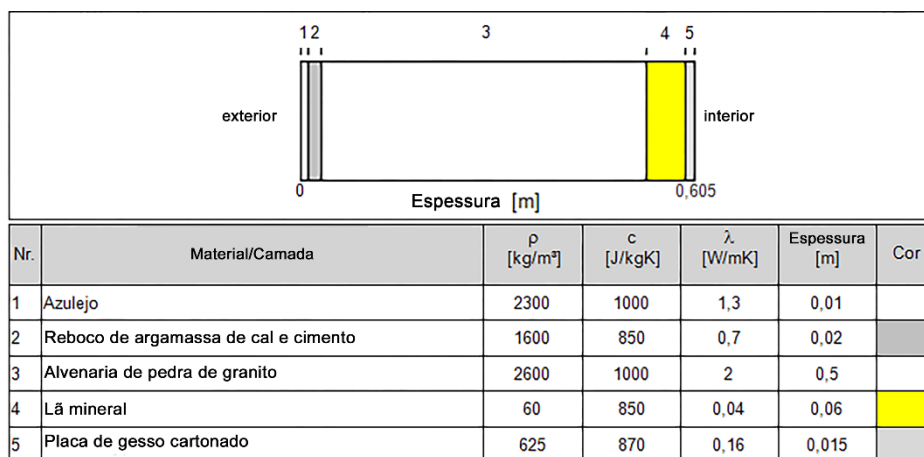


Figura 26 – Posição do isolamento térmico e propriedades das camadas

Seguidamente, apresenta-se na figura 27 um esquema das 5 soluções da parede exterior de fachada, sendo consideradas quatro espessuras diferentes de isolamento acrescidas ao caso inicial, cujos códigos de simulação variam entre P1 e P5.

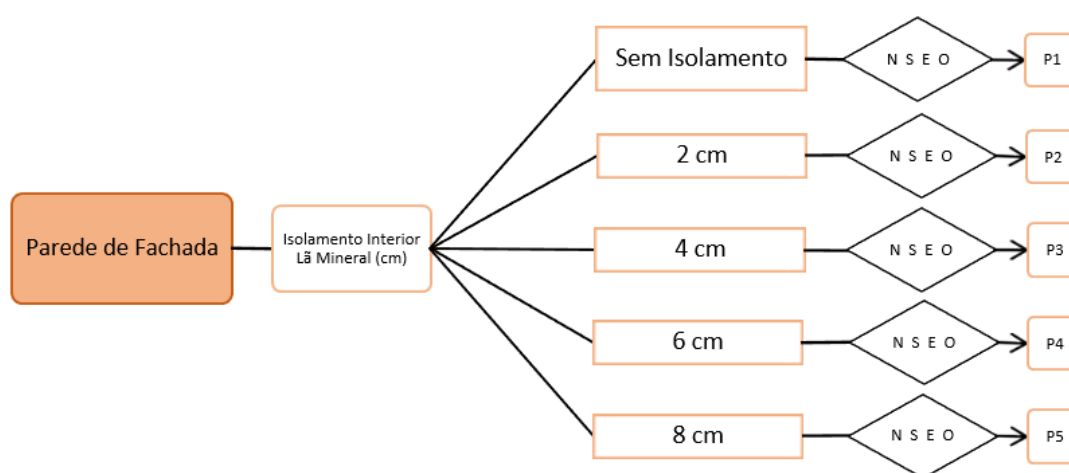


Figura 27 – Soluções consideradas da parede exterior de fachada

3.5.2. VÃOS ENVIDRAÇADOS E PROTEÇÕES SOLARES

Foram também analisados diferentes tipos de vidro e proteções solares. A análise debruçou-se sobre o vidro duplo corrente, cujo fator solar definido no regulamento de térmica de edifícios de habitação (REH [45]) é de 0,75. Considerou-se ainda um vidro de baixa emissividade, que apresenta um fator solar de

0,56, valor máximo para o Verão constante na Portaria 349-B/2013 [24] (considerando uma inércia média/forte e a zona climática do Grande Porto). A caixilharia é de madeira, tendo sido considerado o valor de fração envidraçada de 0,65 apresentado no Despacho n.º 15793-K/2013 [45]. Os vãos consideraram-se com dois tipos de proteção solar: proteções interiores constituídas por portadas de madeira com um fator solar de 0,25; estores exteriores com fator solar de 0,04.

É de realçar que, no modelo de simulação, as proteções solares destinam-se a reduzir o sobreaquecimento e, portanto, são ativadas quando a temperatura sobe acima do valor máximo de conforto térmico definido como sendo 25 °C. Para o período de Inverno, as proteções são ativadas no período da noite (22h - 8h).

Foi considerado um valor de coeficiente de transmissão térmica médio dia-noite (U_{wdn}), tendo sido atribuídos os valores constantes no ITE 50 [46] de acordo com o tipo de vidro e proteção, para uma caixilharia de madeira.

De seguida, apresenta-se uma tabela-resumo das propriedades dos componentes considerados nas simulações.

Tabela 12 – Resumo das principais propriedades dos vãos considerados

	Vidro duplo corrente		Vidro baixa emissividade	
	U_{wdn} [W/(m ² .°C)]	gT	U_{wdn} [W/(m ² .°C)]	gT
Sem Proteção	3,3	0,75	2,6	0,56
Proteção Interior	2,8	0,25	2,3	0,25
Proteção Exterior	2,5	0,04	2,0	0,04

Apresenta-se na figura 28 um esquema das soluções alternativas aos vãos envidraçados em estudo, de acordo com os tipos de vidro e de proteção solar considerados, sendo apresentado um código de simulação para cada caso. O vidro duplo corrente é representado por VE1 e o vidro de baixa emissividade por VE2. A sigla do tipo de proteção é colocada à frente do tipo de vidro correspondendo, deste modo, a ausência de proteção solar a SP, proteção interior a PI e proteção exterior a PE.

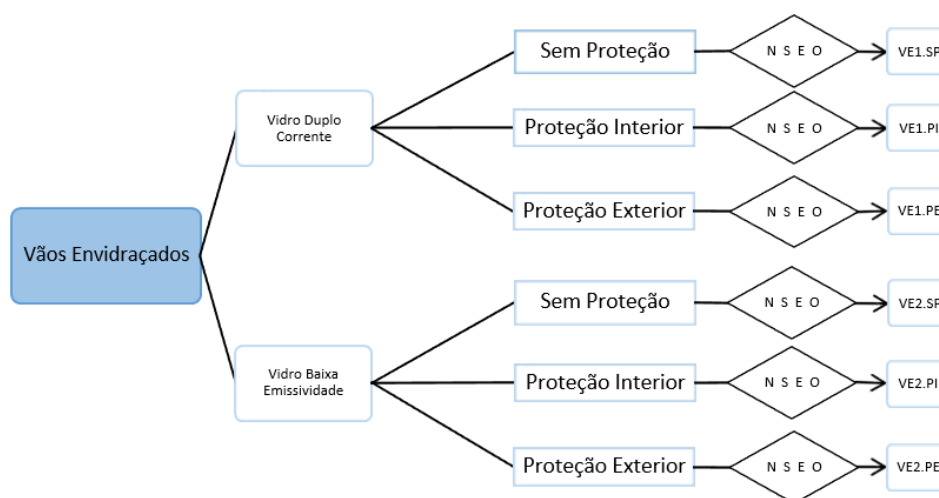


Figura 28 – Soluções consideradas dos vãos envidraçados

3.5.3. VENTILAÇÃO

A ventilação no edifício é totalmente natural, tendo-se considerado que existem infiltrações de ar constantes da ordem das 0,1 renovações por hora. As alterações neste campo foram relativas aos caudais de ventilação.

Como se prevê que as necessidades de arrefecimento sejam consideravelmente inferiores às necessidades de aquecimento (assunto abordado no subcapítulo 3.4.2), decidiu-se fixar a ventilação no período do Verão, considerando um caudal elevado (4 rph) de ventilação durante a noite, do modo a arrefecer o apartamento de forma passiva. Durante o dia, considera-se 0,6 rph por ser o mínimo regulamentar para este período do ano [24]. Por outro lado, na estação de aquecimento da cidade do Porto, aproximadamente entre 15 Outubro a 15 de Abril, opta-se por analisar a influência de diferentes caudais de ventilação.

Na tabela 13 apresenta-se um resumo dos caudais considerados ao longo do ano e do dia.

Tabela 13 – Perfis de ventilação considerados

Período		Renovações por hora (rph)
Estação de Aquecimento 15 Out - 15 Abr	Todo o dia	0.4 / 0.6 / 0.8
Estação de Arrefecimento 1 Jun - 30 Set	Dia (8h-22) Noite (22h-8h)	0.6 4
Restante período do ano	Todo o dia	0.6

Foi adotado o valor de 0,4 renovações por hora por representar o mínimo valor regulamentar [24], sendo que os restantes valores indicam acréscimos ao valor mínimo, multiplicando por 1,5 e 2.

Na figura 29 encontra-se um esquema das variações do número de renovações por hora do ar da zona em estudo. Como nos estudos anteriores, para cada caso é apresentado um código de simulação, variando de V1 a V3 consoante as renovações de ar definidas.

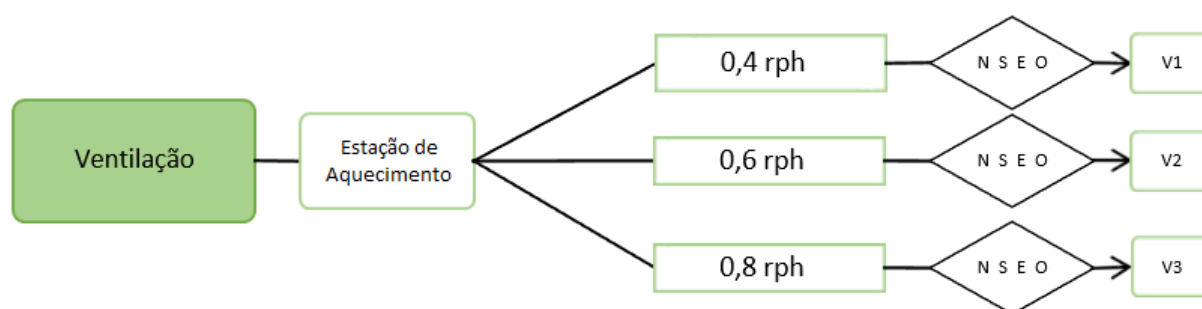


Figura 29 – Soluções consideradas da ventilação

3.5.4. ÁRVORE DE SIMULAÇÕES

Neste ponto indicam-se todos os cenários considerados. A figura 30 representa a árvore final de simulações, referenciando os códigos de cada simulação que correspondem às conjugações dos três cenários descritos anteriormente.

Para cada cenário, foi simulado um período de três anos sendo que apenas serão analisados os dados relativos ao último ano de simulação procurando, assim, uma estabilização dos resultados e evitando distorções resultantes dos dados iniciais.

Foi realizado um total de 224 simulações. Cada simulação teve a duração aproximada de 45 minutos, tendo os resultados sido exportados, posteriormente, para um ficheiro ExcelTM.

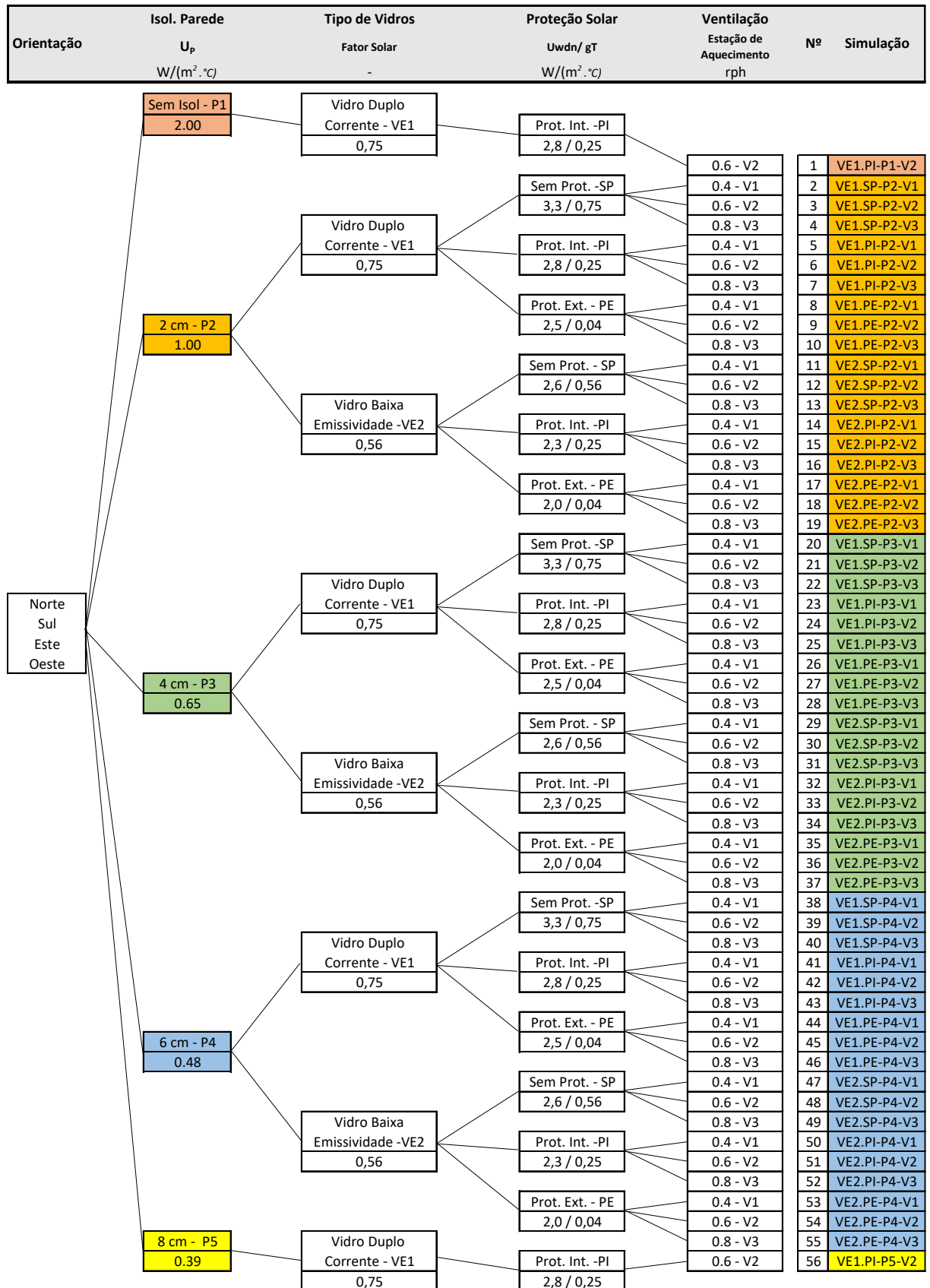


Figura 30 – Árvore das simulações efetuadas

3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Os programas de simulação higrotérmica avançada baseiam-se em cálculos de processos de transporte de calor e humidade em regime dinâmico, o que permite realizar diversas análises relativas a um dado edifício ou componente do mesmo.

Foi detalhado o modelo geométrico utilizado nas simulações avançadas, que pretende representar os edifícios antigos do Centro Histórico do Porto, sendo especificadas todas as condições iniciais relativas ao clima interior e exterior e às componentes pertencentes à zona do modelo em estudo.

No caso da presente dissertação foi escolhido o programa WUFI®Plus para efetuar as simulações. Este programa oferece variadas hipóteses de análise relativas ao clima interior e aos consumos energéticos.

Foram descritas as condições iniciais da análise da quantificação das necessidades de energia útil para que se atinja a gama de temperaturas interiores de conforto térmico durante todo o ano, definida para um intervalo entre os 20°C e os 25°C. Foi igualmente descrito o estudo de sensibilidade que define a influência de alterações da envolvente do edifício nas necessidades de energia para obtenção do conforto térmico.

4

ESTUDO DE SENSIBILIDADE

4.1. OBJETIVO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações efetuadas, recorrendo programa WUFI®Plus, para o estudo de sensibilidade descrito no subcapítulo 3.5.

Para cada cenário de simulação, foram calculados os consumos energéticos para atingir o conforto térmico e a poupança de energia relativa ao caso de maior consumo, tendo sido feitas as seguintes análises:

- Influência da espessura do isolamento térmico na parede de fachada;
- Influência do tipo de vidro e proteção solar;
- Influência da ventilação.

Para o cálculo dos gastos de energia foi considerada a **eletricidade como fonte**, sendo os valores dos consumos energéticos obtidos multiplicados pelo valor genérico médio do preço de eletricidade, que ronda os **0,20 €**.

4.2. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE ISOLAMENTO TÉRMICO DAS FACHADAS

Conforme descrito no subcapítulo 3.5.1, serão analisadas cinco espessuras de isolamento térmico na parede de fachada. Neste caso, não serão analisadas as necessidades de arrefecimento por terem sido registados valores muito baixos, pelo que a influência da espessura de isolamento térmico foi mínima no Verão.

Foram escolhidos valores constantes para os restantes parâmetros relativos aos vãos envidraçados e à ventilação, considerando vidros duplos correntes e uma ventilação de 0,6 renovações por hora.

4.2.1. NECESSIDADES DE ENERGIA PARA AQUECIMENTO

É apresentado na tabela 14 um resumo dos resultados das simulações efetuadas para este cenário, considerando as necessidades de aquecimento para cada orientação e os respetivos gastos de energia.

Tabela 14 – Necessidades globais para aquecimento e respetivos custos para as várias soluções da parede de fachada

Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	U (W/m ² .°C)	Vãos Envidraçados	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
					kWh	€	kWh	€	kWh	€	kWh	€
VE1.PI-P1-V2	Sem Isolamento	2.00	Proteção Interior U _{wdn} =2,80	Estação de Aquecimento	3294.0	658.8	1838.4	367.7	2774.0	554.8	2506.0	501.2
VE1.PI-P2-V2	2	1.00			2790.0	558.0	1456.0	291.2	2307.0	461.4	2080.0	416.0
VE1.PI-P3-V2	4	0.65	Fator Solar g _T =0.75	0,6 rph	2641.0	528.2	1340.8	268.2	2170.0	434.0	1953.0	390.6
VE1.PI-P4-V2	6	0.50			2563.0	512.6	1277.5	255.5	2096.0	419.2	1887.0	377.4
VE1.PI-P5-V2	8	0.40			2516.0	503.2	1245.7	249.1	2053.0	410.6	1847.0	369.4

Neste caso, pode constatar-se que as necessidades anuais de energia para aquecimento são claramente superiores quando a fachada é orientada a Norte, devido à reduzida exposição solar do edifício para esta orientação e consequentes baixos ganhos solares pelos envidraçados. Considerando apenas o caso sem isolamento, o consumo energético atinge o valor máximo de 3294 kWh para a orientação Norte ficando, pelo contrário, abaixo dos 2000 kWh quando a fachada é orientada a Sul. As conclusões relativas aos gastos de energia são semelhantes, sendo os valores relativos à orientação Sul aproximadamente metade dos calculados para a orientação Norte.

Na figura 31 observa-se a evolução gráfica das necessidades anuais de aquecimento para as diferentes espessuras de isolamento térmico consideradas, permitindo uma análise mais clara dos resultados.

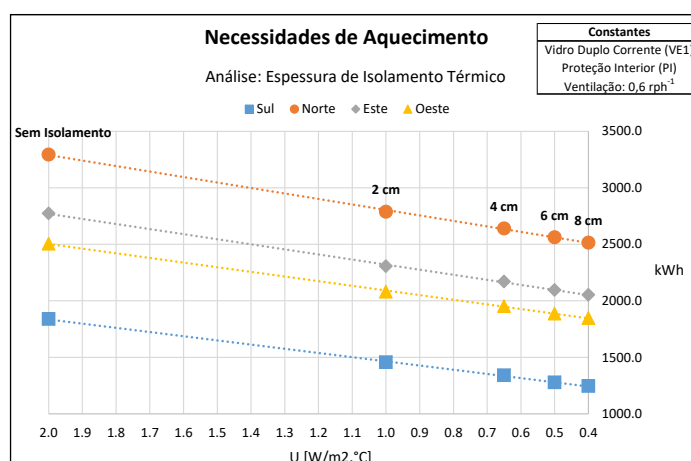


Figura 31 – Evolução das necessidades de aquecimento para as espessuras de isolamento consideradas

Pela análise do gráfico, denota-se uma redução linear dos consumos energéticos com o aumento da espessura de isolamento térmico na parede de fachada, facto que se generaliza para todas as orientações. Os consumos para as orientações Este e Oeste são próximos, apresentando valores intermédios quando comparados com as restantes orientações.

Segundo a Portaria n.º 379-A/2015 [47], o limite regulamentar do coeficiente de transmissão térmica das paredes, na região em estudo, é fixado em 0,50 W/m².°C. Por esta razão, neste caso é exigida a colocação de, pelo menos, 6 cm de isolamento térmico.

4.2.2. POUPANÇA DE ENERGIA

Na figura 32 é analisada a diferença de gastos energéticos anuais considerando isolamento térmico com 2 cm, 4 cm, 6 cm e 8 cm, face à parede original de fachada (sem isolamento).

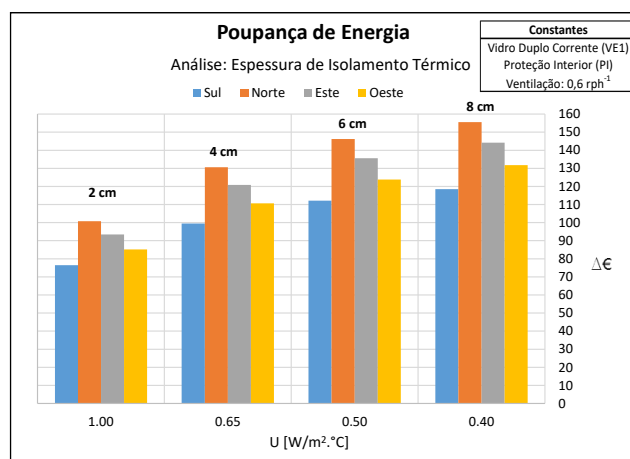


Figura 32 – Poupança de energia elétrica (€) correspondente às necessidades de aquecimento, variando a espessura de isolamento térmico face à solução sem isolamento

Numa primeira análise, evidencia-se uma crescente poupança com o aumento da espessura de isolamento térmico, podendo mesmo ultrapassar os 150 € anuais com 8 cm de espessura, para a orientação Norte. De facto, é para esta orientação que se observa maior poupança, seguida da orientação Este, passando-se o oposto quando se orienta a fachada a Sul. As maiores poupanças a Norte justificam-se por ser para esta orientação que se verificam os maiores consumos para o caso sem isolamento, devido à menor incidência de radiação solar, sendo fundamental que se minimizem as transferências de calor para o exterior.

Pode também concluir-se que o impacto da poupança tende a diminuir com o aumento da espessura de isolamento, isto é, a diferença de custos entre 4 cm e 2 cm de espessura é menor que a diferença de custos entre 6 cm e 4 cm, e assim sucessivamente. Este último facto levou a que nas análises seguintes se considerassem apenas espessuras de isolamento equivalentes a 2 cm, 4 cm e 6 cm.

4.3. INFLUÊNCIA DO TIPO DE VÃO ENVIDRAÇADO E DA PROTEÇÃO SOLAR

Conforme descrito no subcapítulo 3.5.2, será analisada a influência de diferentes tipos de vidro e de proteção solar nas necessidades de aquecimento e arrefecimento da zona em estudo.

Foram escolhidos dois tipos de vidro, o vidro duplo corrente e o vidro de baixa emissividade, sendo considerados dois tipos de proteção solar, portadas interiores e estores exteriores, em adição ao caso sem proteção. O valor adotado para a ventilação foi igual ao da análise anterior, sendo 0,6 renovações por hora para a estação de aquecimento e 4 renovações por hora (à noite) para a estação de arrefecimento.

São feitas análises comparativas de cada tipo de vidro e proteções solares, mantendo constante a espessura de isolamento térmico.

4.3.1. NECESSIDADES DE ENERGIA PARA AQUECIMENTO

Na tabela 15, apresenta-se um resumo dos resultados das necessidades de aquecimento e gastos de energia para as soluções dos vãos envidraçados, considerando 2 cm de isolamento na parede de fachada.

Tabela 15 – Necessidades globais e gastos de energia para aquecimento, para as várias soluções dos vãos envidraçados com 2 cm de isolamento térmico

Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
					kWh	€	kWh	€	kWh	€	kWh	€
VE1.SP-P2-V2	3.30	0.75 (Sem Prot.)	2	Estção de Aquecimento	3029.0	605.8	1680.0	336.0	2555.0	511.0	2265.9	453.2
VE1.PI-P2-V2	2.80	0.25 (Prot. Interior)	2	0,6 rph	2790.0	558.0	1457.0	291.4	2307.5	461.5	2085.0	417.0
VE1.PE-P2-V2	2.50	0.04 (Prot. Exterior)	2	0,6 rph	2635.7	527.1	1322.7	264.5	2162.2	432.4	1965.2	393.0
VE2.SP-P2-V2	2.60	0.56 (Sem Prot.)	2	Estção de Aquecimento	2890.9	578.2	1774.3	354.9	2489.6	497.9	2219.3	443.9
VE2.PI-P2-V2	2.30	0.25 (Prot. Interior)	2	0,6 rph	2734.7	546.9	1633.0	326.6	2337.8	467.6	2104.6	420.9
VE2.PE-P2-V2	2.00	0.04 (Prot. Exterior)	2	0,6 rph	2578.8	515.8	1493.2	298.6	2186.2	437.2	1973.1	394.6

À semelhança da análise para as soluções da parede de fachada, realizada no subcapítulo 4.2.1, pode constatar-se que os consumos energéticos anuais são superiores quando a fachada é orientada a Norte, para ambos os tipos de vidro. O valor máximo foi atingido para o caso do vidro duplo corrente sem proteção solar e orientado a Norte, sendo o valor mínimo calculado para o cenário que representa o mesmo vidro com proteção pelo exterior e orientado a Sul.

Na figura 33 observa-se a evolução gráfica das necessidades anuais de aquecimento para os diferentes tipos de vidro considerados.

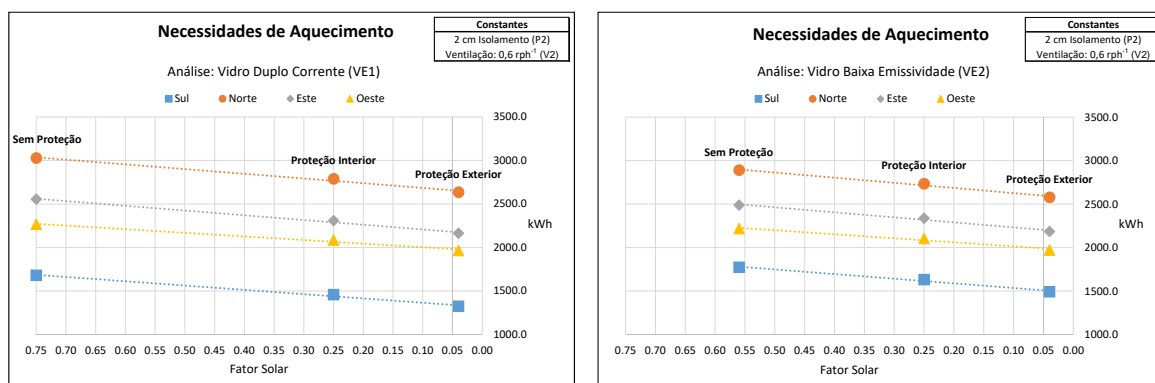


Figura 33 – Necessidades de aquecimento para diferentes tipos de vidro e proteções solares, com 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada

Analisando os gráficos, nota-se uma redução dos consumos energéticos com a colocação de proteção solar, para ambos os casos, o que pode ser explicado pela resistência térmica adicionada pelas proteções durante o período noturno em que se encontram ativadas. O maior impacto da proteção exterior advém do facto de ter sido considerado um coeficiente de transmissão térmica diferente para as duas proteções.

Comparando ambos os vidros, os consumos são maiores para o vidro de baixa emissividade quando a fachada é orientada a Sul, pois este vidro apresenta um menor fator solar, levando a um menor aproveitamento da elevada radiação solar incidente para esta orientação. Quando a fachada é orientada a Norte, em que a radiação solar incidente é reduzida, a utilização do vidro baixo emissivo traduz-se em menores consumos de energia por refletir a radiação gerada no interior da habitação. Para as restantes orientações, os consumos são semelhantes para os dois tipos de vidro, sendo maiores a Este do que a Oeste.

Como referido na introdução do presente capítulo, foram realizadas duas análises adicionais em tudo iguais à anterior, porém, para espessuras de isolamento térmico de 4 cm e 6 cm, respetivamente. Contudo, estas não são abordadas por apresentarem resultados semelhantes aos já demonstrados, havendo apenas uma diminuição generalizada dos consumos justificada pelo aumento do isolamento térmico,

confirmando a análise realizada no subcapítulo 4.2.1. Os resultados das análises citadas podem ser consultados no anexo A.

4.3.2. NECESSIDADES DE ENERGIA PARA ARREFECIMENTO

Na tabela 16 apresenta-se um resumo dos resultados das necessidades de arrefecimento e gastos de energia para as soluções dos vãos envidraçados, considerando 2 cm de isolamento na parede de fachada.

Tabela 16 – Necessidades e gastos de energia para arrefecimento, para as soluções dos vãos envidraçados com 2 cm de isolamento térmico

Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Arrefecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior La Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
					kWh	€	kWh	€	kWh	€	kWh	€
VE1.SP-P2-V2	3.3	0.75 (Sem Prot.)	2	Estção de Aquecimento	18.5	3.7	197.0	39.4	68.8	13.8	650.0	130.0
VE1.PI-P2-V2	2.8	0.25 (Prot. Interior)	2	Estção de Aquecimento	1.4	0.7	9.4	3.5	4.1	2.1	32.0	8.4
VE1.PE-P2-V2	2.5	0.04 (Prot. Exterior)	2	0,6 rph	1.0	0.2	2.6	0.5	2.3	0.5	1.7	0.3
VE2.SP-P2-V2	2.6	0.56 (Sem Prot.)	2	Estção de Aquecimento	5.5	1.1	79.6	15.9	23.1	4.6	348.3	69.7
VE2.PI-P2-V2	2.3	0.25 (Prot. Interior)	2	Estção de Aquecimento	0.4	0.1	5.7	1.1	2.3	0.5	14.9	3.0
VE2.PE-P2-V2	2.0	0.04 (Prot. Exterior)	2	0,6 rph	0.2	0.0	2.1	0.4	1.3	0.3	1.3	0.3

Em primeiro lugar, pode mais uma vez constatar-se que as necessidades de arrefecimento são consideravelmente inferiores às necessidades de aquecimento analisadas no subcapítulo 4.3.1, tendo sido obtido um valor máximo de 650 kWh para o caso do vidro duplo corrente, sem proteção solar e orientado a Oeste.

Na figura 34 observa-se a evolução gráfica das necessidades anuais de arrefecimento para os diferentes tipos de vidro considerados.

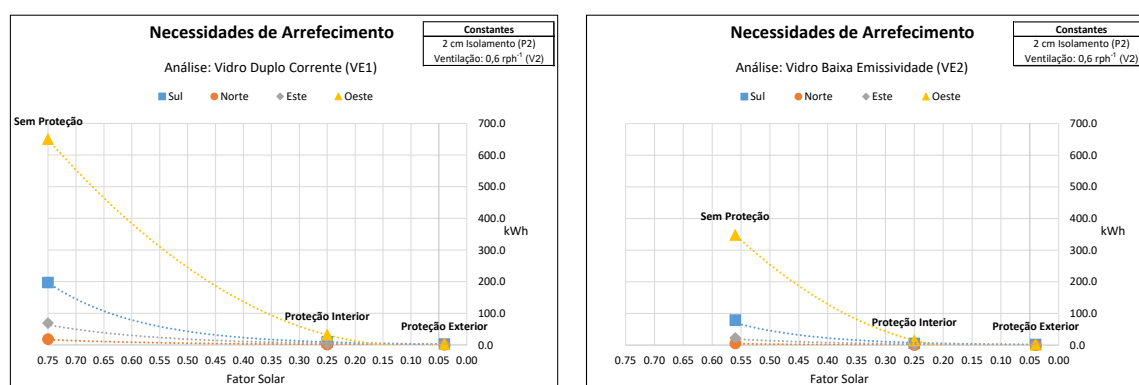


Figura 34 – Necessidades de arrefecimento para diferentes tipos de vidro e proteções solares, com 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada

Numa primeira análise dos gráficos, nota-se uma forte redução dos consumos energéticos com a colocação de proteção solar, para ambos os tipos de vidro e para todas as orientações. Conclui-se que a ativação das proteções é fundamental na redução das necessidades de arrefecimento sendo que, neste caso, a diferença entre a proteção pelo interior e a proteção pelo exterior não é significativa.

Pode também denotar-se que o vidro de baixa emissividade apresenta valores de consumo inferiores aos do vidro duplo corrente, tornando-se mais evidente para os casos sem proteção solar. Constata-se também que quando o edifício é orientado a Oeste os consumos energéticos são mais elevados. Pode justificar-se que, para esta orientação, o sol se encontra mais rasante fazendo com que a radiação penetre no vidro de forma mais direta, aumentando a transferência de calor. Para as restantes orientações, os consumos são menores, tornando-se praticamente nulos para Este e Norte.

Tal como referido na análise de energia para aquecimento, os resultados das análises adicionais para 4 cm e 6 cm de isolamento são semelhantes aos já mencionados, havendo apenas uma diminuição generalizada dos consumos, justificada pelo aumento do isolamento térmico, confirmando a análise realizada no subcapítulo 4.2.1. Os resultados das análises citadas podem ser consultados no anexo A.

4.3.3. POUPANÇA DE ENERGIA

Neste ponto é analisada a diferença de gastos com energia entre cada caso considerado com proteção solar (interior e exterior) e o caso sem proteção, para cada tipo de vidro. Como a poupança de energia foi bastante semelhante para as diferentes análises dos vãos envidraçados, realizadas para três espessuras de isolamento da parede de fachada (2 cm, 4 cm e 6 cm), foi feita uma média dos seus valores.

O estudo da poupança de energia relativa às necessidades de aquecimento apresenta-se na figura 35.

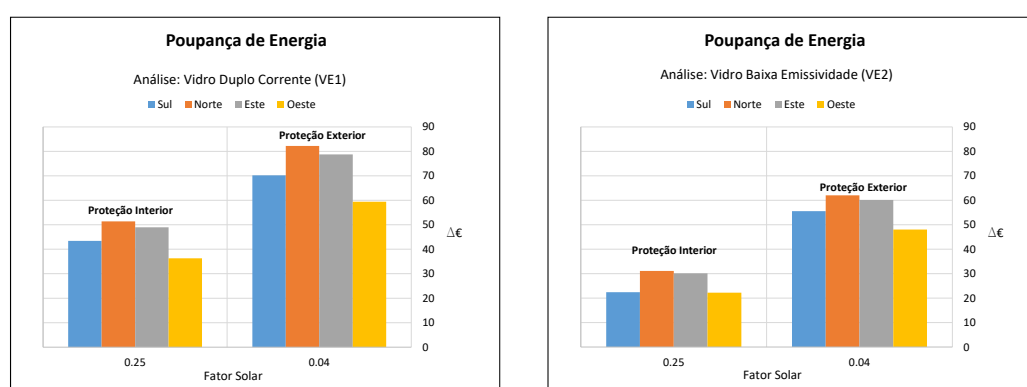


Figura 35 – Poupança de energia nas necessidades de aquecimento, para cada tipo de vidro e proteção solar relativamente ao caso sem proteção solar

Analisando os gráficos, evidencia-se uma maior poupança de energia na colocação de proteções solares pelo exterior, podendo superar os 80 € anuais no caso do vidro duplo corrente orientado a Norte. Para o caso da proteção exterior, a poupança é, em média, 28 € superior à colocação de proteção interior, para ambos os vidros.

Comparando os tipos de vidro, há maior poupança de energia na colocação de proteções solares para o vidro duplo corrente. Este facto pode ser explicado não só pelos menores consumos energéticos do vidro de baixa emissividade sem proteção solar, mas também pela semelhança dos consumos de ambos os vidros para os casos com proteção solar.

Quanto à orientação, verifica-se maior economia de energia quando a fachada é orientada a Norte, seguida da orientação Este. Pelo contrário, a orientação Oeste confere menor poupança pelo consumo de energia ser mais baixo.

Deste modo, considerando as necessidades de aquecimento, pode concluir-se que a colocação de estores exteriores é o melhor caso, porém, como o contexto histórico dos edifícios em estudo não a permite, a melhor solução passa pela colocação de portadas interiores.

Na figura 36 é apresentado o estudo de poupança de energia para as necessidades de arrefecimento.

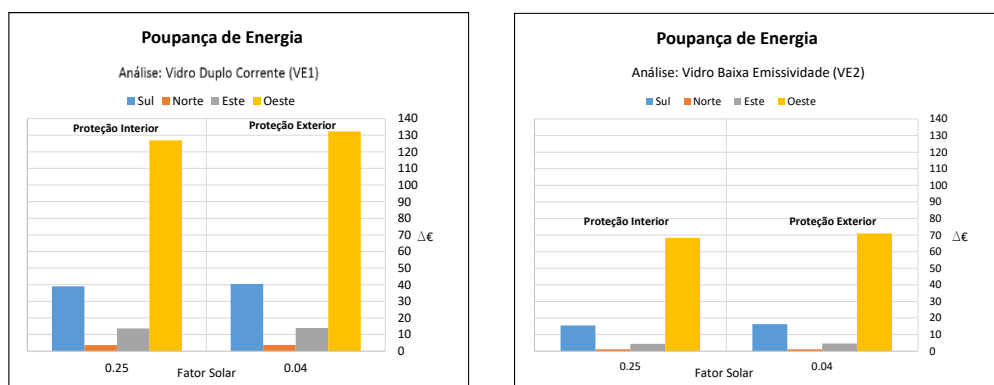


Figura 36 – Poupança de energia nas necessidades de arrefecimento, para cada tipo de vidro e proteção solar relativamente ao caso sem proteção solar

Pela análise dos gráficos, verifica-se uma poupança substancial de energia na colocação de proteção solar quando o edifício é orientado a Oeste, podendo ultrapassar os 130 € anuais para o caso do vidro duplo corrente e os 70 € anuais para o caso do vidro de baixa emissividade. A economia de energia para a orientação Sul ainda é considerável, porém, muito inferior às poupanças para a orientação Oeste. Para as restantes orientações, a economia de energia é mínima pois as necessidades de arrefecimento já apresentam valores muito baixos sem a colocação de qualquer proteção solar, conforme se concluiu no subcapítulo 4.3.2.

4.4. INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO

Conforme descrito no subcapítulo 3.5.3, será analisada a influência da ventilação da zona em estudo nas necessidades de aquecimento. As necessidades de arrefecimento não serão quantificadas uma vez que o caudal de ventilação não foi alterado na estação de arrefecimento.

Nas análises seguintes, serão considerados dois caudais de ventilação, 0,4 rph e 0,8 rph, para cada tipo de vidro e proteção solar e mantendo constante a espessura de isolamento térmico na parede de fachada.

4.4.1. NECESSIDADES DE ENERGIA PARA AQUECIMENTO

Na tabela 17, apresenta-se um resumo dos resultados das necessidades de aquecimento e gastos de energia para o cenário do vidro duplo corrente, considerando 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada.

Tabela 17 – Necessidades globais e gastos de energia para aquecimento para as várias soluções de ventilação do vidro duplo corrente, com 2 cm de isolamento térmico

Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
					kWh	€	kWh	€	kWh	€	kWh	€
VE1.SP-P2-V1	3.3	0.75 (Sem Prot.)	2	Estação de Aquecimento 0,4 rph	2661.0	532.2	1336.3	267.3	2176.0	435.2	1900.2	380.0
VE1.PI-P2-V1	2.8	0.25 (Prot. Interior)	2		2402.9	480.6	1110.3	222.1	1931.6	386.3	1715.2	343.0
VE1.PE-P2-V1	2.5	0.04 (Prot. Exterior)	2		2248.5	449.7	994.4	198.9	1786.2	357.2	1599.4	319.9
VE1.SP-P2-V3	3.3	0.75 (Sem Prot.)	2	Estação de Aquecimento 0,8 rph	3438.1	687.6	2032.5	406.5	2938.6	587.7	2643.1	528.6
VE1.PI-P2-V3	2.8	0.25 (Prot. Interior)	2		3179.0	635.8	1806.0	361.2	2688.0	537.6	2458.7	491.7
VE1.PE-P2-V3	2.5	0.04 (Prot. Exterior)	2		3024.0	604.8	1666.7	333.3	2540.5	508.1	2339.2	467.8

À semelhança da análise feita no subcapítulo 4.3.1, pode constatar-se que as necessidades de aquecimento são mais elevadas para a orientação Norte, tendo o valor máximo de 3438 kWh sido registado para o vidro sem proteção e com uma ventilação de 0,8 renovações por hora.

Na figura 37 observa-se a evolução gráfica das necessidades anuais de aquecimento do vidro duplo corrente, tendo em conta os diferentes perfis de ventilação considerados.

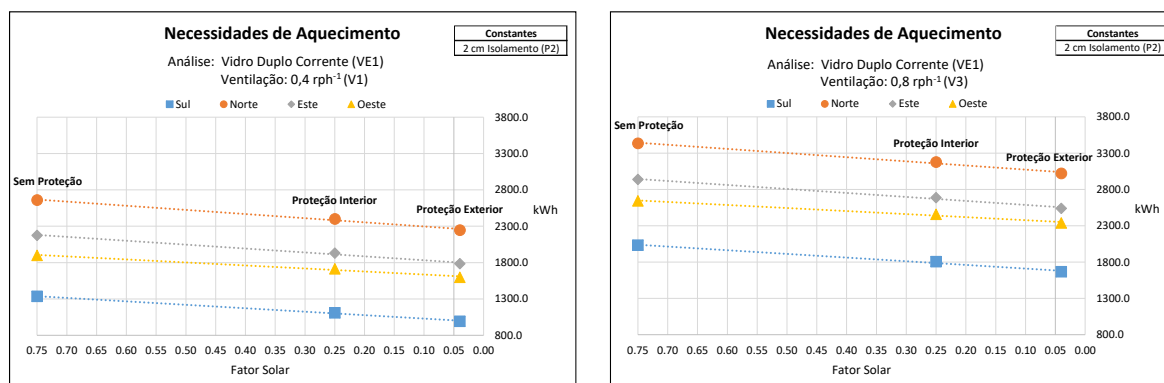


Figura 37 – Necessidades de aquecimento das soluções de ventilação para o vidro duplo corrente, com 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada

Analisando a figura, verifica-se um aumento generalizado dos consumos energéticos para aquecimento com o aumento do caudal de ventilação de 0,4 para 0,8 renovações por hora. As diferenças nos consumos dos dois casos ultrapassam, em média, os 700 kWh, pelo que se conclui que as soluções de ventilação têm, em geral, um maior impacto que as soluções consideradas para as paredes de fachada, no subcapítulo 4.2.1, e para os vãos envidraçados, no subcapítulo 4.3.1.

Na tabela 18 é apresentado um resumo dos resultados das necessidades de aquecimento e gastos de energia para o cenário do vidro de baixa emissividade, considerando 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada.

Tabela 18 – Necessidades e gastos de energia para aquecimento para as soluções de ventilação do vidro de baixa emissividade, com 2 cm de isolamento térmico

Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
VE2.SP-P2-V1	2.6	0.56 (Sem Prot.)	2	Estação de Aquecimento	2501.6	500.3	1442.3	288.5	2106.7	421.3	1846.9	369.4
VE2.PI-P2-V1	2.3	0.25 (Prot. Interior)	2	Estação de Aquecimento	2346.2	469.2	1285.8	257.2	1957.7	391.5	1733.6	346.7
VE2.PE-P2-V1	2.0	0.04 (Prot. Exterior)	2	0,4 rph	2191.0	438.2	1148.7	229.7	1805.6	361.1	1604.3	320.9
VE2.SP-P2-V3	2.6	0.56 (Sem Prot.)	2	Estação de Aquecimento	3281.0	656.2	2134.7	426.9	2874.2	574.8	2597.5	519.5
VE2.PI-P2-V3	2.3	0.25 (Prot. Interior)	2	Estação de Aquecimento	3124.6	624.9	1991.2	398.2	2722.8	544.6	2481.4	496.3
VE2.PE-P2-V3	2.0	0.04 (Prot. Exterior)	2	0,8 rph	2968.1	593.6	1848.1	369.6	2570.0	514.0	2348.4	469.7

Os resultados são idênticos aos do vidro duplo corrente apresentando, contudo, valores de consumos energéticos inferiores para o vidro de baixa emissividade.

Na figura 38 mostra-se a evolução gráfica das necessidades anuais de aquecimento do vidro de baixa emissividade, tendo em conta os diferentes perfis de ventilação considerados.

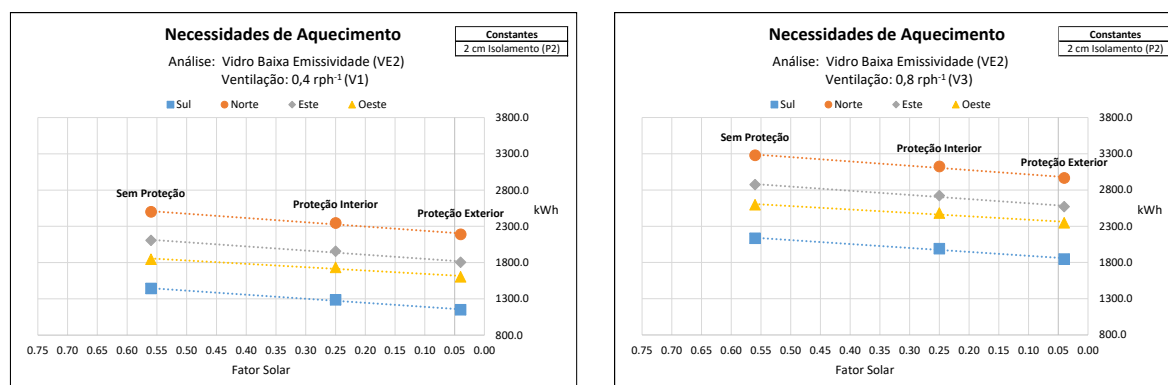


Figura 38 – Necessidades de aquecimento das soluções de ventilação para o vidro de baixa emissividade, com 2 cm de isolamento térmico na parede de fachada

Pela comparação de ambos os gráficos, observa-se um aumento substancial dos consumos com o aumento da ventilação, reforçando o seu impacto nas necessidades de energia da zona em estudo.

Foram realizadas duas análises adicionais, em tudo iguais às anteriores, para espessuras de isolamento térmico de 4 cm e 6 cm, respetivamente. Contudo, estas não são abordadas pois obtiveram resultados semelhantes aos já demonstrados, havendo apenas uma diminuição generalizada dos consumos justificada pelo aumento do isolamento térmico, facto que confirma a análise realizada no subcapítulo 4.2.1. Os resultados dessas análises podem ser consultados no anexo A.

4.4.2. POUPANÇA DE ENERGIA

De seguida, será avaliada a poupança de energia na redução do caudal de ventilação de 0,6 rph para 0,4 rph e de 0,8 rph para 0,4 rph.

Como a poupança de energia foi praticamente igual para as diferentes análises de ventilação realizadas, tanto para as variações de espessura de isolamento como para os diversos tipos de vidro e proteção solar, foi feita uma média dos seus valores para cada orientação. Na figura 39 é apresentado o estudo da poupança de energia para as necessidades de aquecimento.

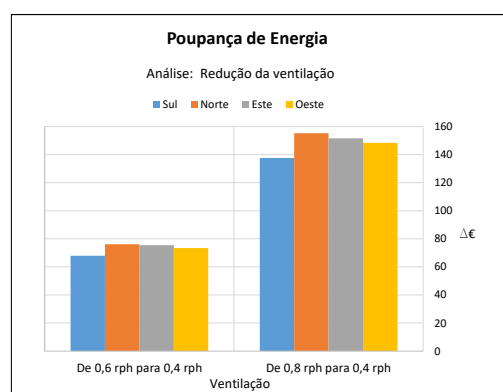


Figura 39 – Poupança de energia nas necessidades de aquecimento das soluções de ventilação consideradas, para cada tipo de vidro

Como se pode constatar pela análise dos gráficos, é possível economizar cerca de 80 € quando se reduz a ventilação de 0,6 rph para 0,4 rph e cerca de 140 € na redução de 0,8 rph para 0,4 rph, não existindo uma diferença considerável entre as diversas orientações.

4.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados do estudo de sensibilidade descrito no subcapítulo 3.5. As análises foram divididas de acordo com os cenários de simulação considerados para as paredes de fachada, para os vidros e proteções solares, e para a ventilação.

Primeiramente, foi analisada a influência da espessura de isolamento térmico da parede de fachada nas necessidades de aquecimento da zona em estudo. Concluiu-se que os consumos energéticos diminuem consideravelmente com o aumento da espessura de isolamento térmico, sendo a poupança de energia considerável em relação ao caso sem isolamento, especialmente quando se orienta o edifício a Norte. Atingiu-se o menor valor de consumo energético para 8 cm de espessura. Contudo, como a diferença de consumos de 8 cm para 6 cm de espessura foi pequena, nas restantes análises não foi considerada a espessura de 8 cm.

Quanto à análise dos vãos envidraçados, verificaram-se diferenças nos consumos de energia para aquecimento e arrefecimento. Relativamente ao aquecimento, o vidro de baixa emissividade apresentou menores consumos para a orientação Norte por refletir a radiação gerada no interior da habitação. O vidro duplo corrente conduziu a menores consumos para a orientação Sul, por apresentar um maior fator solar, levando a um maior aproveitamento da elevada radiação solar incidente para esta orientação. Nas restantes orientações, não se registaram diferenças significativas entre os vidros. Relativamente ao arrefecimento, o vidro baixo emissivo conduziu a menores consumos em todas as orientações.

Constatou-se também que as proteções solares têm um forte impacto na redução das necessidades de energia útil, reduzindo o sobreaquecimento no Verão e oferecendo uma maior resistência térmica aos vãos envidraçados no período da noite, no Inverno.

Relativamente à ventilação, notou-se uma considerável diminuição dos consumos energéticos para aquecimento com a redução do caudal de renovação de ar interior para 0,4 rph.

5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1. OBJETIVO

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos para o estudo de sensibilidade realizado no capítulo 4. O objetivo da análise será a identificação da solução ótima representativa dos menores consumos energéticos, tendo em conta as variáveis consideradas nos cenários de simulação. Após a análise, serão feitas recomendações para a prática da reabilitação, procurando auxiliar os projetistas na escolha da solução que garanta o melhor desempenho térmico e a melhor eficiência energética.

5.2. NÍVEIS DE QUALIDADE

Para uma análise mais intuitiva dos resultados, foram estabelecidos níveis de qualidade, identificados por cores na figura 40, que permitem avaliar o desempenho energético dos cenários de simulação.

Níveis de Qualidade		
%	Nível	Cor
0-20	N1	
20-40	N2	
40-60	N3	
60-80	N4	
80-100	N5	

Figura 40 – Níveis de qualidade segundo os consumos energéticos

Foram considerados cinco níveis correspondentes a gamas de 20% cada, sendo adotado o **nível de qualidade mínimo (0%)** para o maior valor de consumo e o **nível de qualidade máximo (100%)** para o menor valor de consumo. Tendo em conta estes limites, foram interpolados os restantes consumos.

Da figura 41 à figura 44 apresentam-se os resultados catalogados pelos níveis de qualidade referidos. Cada figura representa uma orientação e distingue as necessidades de aquecimento, de arrefecimento, e totais, sendo destacado a verde o cenário que garante o melhor nível de qualidade.

Orientação OESTE							
Isolamento na Parede	Tipo de Vidro	Proteção Solar	Ventilação	Simulação	Necessidades Aquecimento kWh	Necessidades Arrefecimento kWh	Necessidades Totais kWh
0 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,6 rph	VE1.PI-P1-V2	2506.0	30.0	2536.0
			0,4 rph	VE1.SP-P2-V1	1900.2	676.6	2576.8
			0,6 rph	VE1.SP-P2-V2	2265.9	650.0	2915.9
2 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Sem Prot.	0,6 rph	VE1.SP-P2-V2	2643.1	668.9	3312.0
			0,8 rph	VE1.SP-P2-V3	1715.2	30.6	1745.8
			0,4 rph	VE1.PI-P2-V1	2085.0	32.0	2117.0
		Prot. Int.	0,6 rph	VE1.PI-P2-V2	2458.7	30.7	2489.4
			0,8 rph	VE1.PI-P2-V3	1599.4	1.7	1601.1
			0,4 rph	VE1.PI-P2-V1	1965.2	1.7	1966.9
	Vidro Duplo Corrente	Prot. Ext.	0,6 rph	VE1.PE-P2-V2	2339.2	1.7	2340.9
			0,8 rph	VE1.PE-P2-V3	1846.9	350.6	2197.5
			0,4 rph	VE2.SP-P2-V1	2219.3	348.3	2567.6
		Sem Prot.	0,6 rph	VE2.SP-P2-V2	2597.5	346.9	2944.4
			0,8 rph	VE2.SP-P2-V3	1733.6	14.8	1748.4
			0,4 rph	VE2.PI-P2-V1	2104.6	14.9	2119.5
4 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,6 rph	VE2.PI-P2-V2	2481.4	14.9	2496.3
			0,8 rph	VE2.PI-P2-V3	1604.3	1.4	1605.7
			0,4 rph	VE2.PI-P2-V1	1973.1	1.3	1974.4
		Prot. Ext.	0,6 rph	VE2.PE-P2-V2	2348.4	1.3	2349.7
			0,8 rph	VE2.PE-P2-V3	1770.0	690.2	2460.2
			0,4 rph	VE1.SP-P3-V1	2138.0	650.0	2788.0
	Vidro Duplo Corrente	Sem Prot.	0,6 rph	VE1.SP-P3-V2	2511.6	681.5	3193.1
			0,8 rph	VE1.SP-P3-V3	1592.7	31.1	1623.8
			0,4 rph	VE1.PI-P3-V1	1956.5	32.0	1988.5
		Prot. Int.	0,6 rph	VE1.PI-P3-V2	2328.7	31.2	2359.9
			0,8 rph	VE1.PI-P3-V3	1480.8	1.5	1482.3
			0,4 rph	VE1.PI-P3-V1	1840.8	1.7	1842.5
	Vidro Duplo Corrente	Prot. Ext.	0,6 rph	VE1.PE-P3-V2	2213.0	1.5	2214.5
			0,8 rph	VE1.PE-P3-V3	1715.4	358.6	2074.0
			0,4 rph	VE2.SP-P3-V1	2087.3	355.9	2443.2
		Sem Prot.	0,6 rph	VE2.SP-P3-V2	2463.7	354.4	2818.1
			0,8 rph	VE2.SP-P3-V3	1605.7	14.5	1620.2
			0,4 rph	VE2.PI-P3-V1	1976.1	14.3	1990.4
6 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,6 rph	VE2.PI-P3-V2	2353.0	14.3	2367.3
			0,8 rph	VE2.PI-P3-V3	1479.1	1.1	1480.2
			0,4 rph	VE2.PI-P3-V1	1847.1	1.0	1848.1
		Prot. Ext.	0,6 rph	VE2.PE-P3-V2	2222.9	1.1	2224.0
			0,8 rph	VE2.PE-P3-V3	1704.5	698.0	2402.5
			0,4 rph	VE1.SP-P4-V1	2070.0	670	2740.0
	Vidro Duplo Corrente	Sem Prot.	0,6 rph	VE1.SP-P4-V2	2443.2	688.4	3131.6
			0,8 rph	VE1.SP-P4-V3	1529.5	31.5	1561.0
			0,4 rph	VE1.PI-P4-V1	1889.0	30.0	1919.0
		Prot. Int.	0,6 rph	VE1.PI-P4-V2	2260.5	31.5	2292.0
			0,8 rph	VE1.PI-P4-V3	1414.9	1.5	1416.4
			0,4 rph	VE1.PI-P4-V1	1777.0	1.4	1778.4
8 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Ext.	0,6 rph	VE1.PE-P4-V2	2145.1	1.4	2146.5
			0,8 rph	VE1.PE-P4-V3	1647.4	362.1	2009.5
			0,4 rph	VE2.SP-P4-V1	2017.8	359.3	2377.1
		Sem Prot.	0,6 rph	VE2.SP-P4-V2	2395.1	357.8	2752.9
			0,8 rph	VE2.SP-P4-V3	1540.7	14.3	1555.0
			0,4 rph	VE2.PI-P4-V1	1910.1	14.3	1924.4
	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,6 rph	VE2.PI-P4-V2	2285.2	14.4	2299.6
			0,8 rph	VE2.PI-P4-V3	1413.2	1.0	1414.2
			0,4 rph	VE2.PI-P4-V1	1779.8	1.0	1780.8
		Prot. Ext.	0,6 rph	VE2.PE-P4-V2	2152.9	1.1	2154.0
			0,8 rph	VE2.PE-P4-V3	1847.0	31.5	1878.5
			0,4 rph	VE1.PI-P5-V2			

Percentagem	Necessidades Aquecimento kWh	Necessidades Arrefecimento kWh	Necessidades Totais kWh
0	2643.1	698.0	3341.0
20	2397.1	558.6	2955.7
40	2151.1	419.2	2570.3
60	1905.2	279.8	2185.0
80	1659.2	140.4	1800.0
100	1413.2	1.0	1414.2

Níveis de Qualidade		
%	Nível	Cor
0-20	N1	
20-40	N2	
40-60	N3	
60-80	N4	
80-100	N5	

Figura 41 – Classificação das soluções orientadas a Oeste segundo os níveis de qualidade

Orientação SUL								
Isolamento na Parede	Tipo de Vidro	Proteção Solar	Ventilação	Simulação	Necessidades Aquecimento kWh	Necessidades Arrefecimento kWh	Necessidades Totais kWh	
0 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int	0,6 rph	VE1.PI-P1-V2	1838.4	10.3	1848.7	
		Sem Prot.	0,4 rph	VE1.SP-P2-V1	1336.3	203.9	1540.2	
			0,6 rph	VE1.SP-P2-V2	1680.0	197.0	1877.0	
2 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente		Prot. Int	0,8 rph	VE1.SP-P2-V3	2032.5	187.0	2219.5
		Sem Prot.		0,4 rph	VE1.PI-P2-V1	1110.3	10.8	1121.1
				0,6 rph	VE1.PI-P2-V2	1457.0	9.4	1466.4
			0,8 rph	VE1.PI-P2-V3	1806.0	9.5	1815.5	
		Prot. Ext	0,4 rph	VE1.PE-P2-V1	994.4	2.6	997.0	
			0,6 rph	VE1.PE-P2-V2	1322.7	2.6	1325.3	
	0,8 rph		VE1.PE-P2-V3	1666.7	2.6	1669.3		
	Vidro Baixa Emissividade	Sem Prot.	0,4 rph	VE2.SP-P2-V1	1442.2	86.0	1528.2	
			0,6 rph	VE2.SP-P2-V2	1774.3	79.6	1853.9	
			0,8 rph	VE2.SP-P2-V3	2134.7	75.9	2210.6	
		Prot. Int	0,4 rph	VE2.PI-P2-V1	1285.8	5.6	1291.4	
			0,6 rph	VE2.PI-P2-V2	1633.0	5.7	1638.7	
			0,8 rph	VE2.PI-P2-V3	1991.2	5.6	1996.8	
		Prot. Ext	0,4 rph	VE2.PE-P2-V1	1148.7	2.1	1150.8	
			0,6 rph	VE2.PE-P2-V2	1493.2	2.1	1495.3	
0,8 rph			VE2.PE-P2-V3	1848.1	2.1	1850.2		
4 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Sem Prot.	0,4 rph	VE1.SP-P3-V1	1220.5	218.4	1438.9	
			0,6 rph	VE1.SP-P3-V2	1561.0	205.0	1766.0	
			0,8 rph	VE1.SP-P3-V3	1911.8	194.6	2106.4	
		Prot. Int	0,4 rph	VE1.PI-P3-V1	1011.6	10.0	1021.6	
			0,6 rph	VE1.PI-P3-V2	1344.0	10.0	1354.0	
			0,8 rph	VE1.PI-P3-V3	1688.3	10.1	1698.4	
		Prot. Ext	0,4 rph	VE1.PE-P3-V1	886.1	2.7	888.8	
			0,6 rph	VE1.PE-P3-V2	1210.0	2.7	1212.7	
			0,8 rph	VE1.PE-P3-V3	1551.8	2.7	1554.5	
	Vidro Baixa Emissividade	Sem Prot.	0,4 rph	VE2.SP-P3-V1	1304.9	90.5	1395.4	
			0,6 rph	VE2.SP-P3-V2	1653.4	83.0	1736.4	
			0,8 rph	VE2.SP-P3-V3	2011.8	78.6	2090.4	
		Prot. Int	0,4 rph	VE2.PI-P3-V1	1168.9	5.2	1174.1	
			0,6 rph	VE2.PI-P3-V2	1541.3	5.3	1546.6	
			0,8 rph	VE2.PI-P3-V3	1871.3	5.3	1876.6	
		Prot. Ext	0,4 rph	VE2.PE-P3-V1	1033.8	2.0	1035.8	
			0,6 rph	VE2.PE-P3-V2	1375.6	1.8	1377.4	
			0,8 rph	VE2.PE-P3-V3	1727.6	1.8	1729.4	
6 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Sem Prot.	0,4 rph	VE1.SP-P4-V1	1162.0	223.6	1385.6	
			0,6 rph	VE1.SP-P4-V2	1500.0	209.3	1709.3	
			0,8 rph	VE1.SP-P4-V3	1849.4	198.1	2047.5	
		Prot. Int	0,4 rph	VE1.PI-P4-V1	953.5	10.0	963.5	
			0,6 rph	VE1.PI-P4-V2	1284.0	10.0	1294.0	
			0,8 rph	VE1.PI-P4-V3	1625.5	10.0	1635.5	
	Prot. Ext	0,4 rph	VE1.PE-P4-V1	831.6	2.3	833.9		
		0,6 rph	VE1.PE-P4-V2	1152.0	2.3	1154.3		
		0,8 rph	VE1.PE-P4-V3	1491.7	2.3	1494.0		
	Vidro Baixa Emissividade	Sem Prot.	0,4 rph	VE2.SP-P4-V1	1243.4	92.7	1336.1	
			0,6 rph	VE2.SP-P4-V2	1590.6	85.1	1675.7	
			0,8 rph	VE2.SP-P4-V3	1948.7	80.1	2028.8	
Prot. Int		0,4 rph	VE2.PI-P4-V1	1110.2	5.2	1115.4		
		0,6 rph	VE2.PI-P4-V2	1453.7	5.2	1458.9		
		0,8 rph	VE2.PI-P4-V3	1807.0	5.2	1812.2		
8 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Ext	0,4 rph	VE2.PE-P4-V1	972.8	1.8	974.6	
			0,6 rph	VE2.PE-P4-V2	1312.4	1.8	1314.2	
			0,8 rph	VE2.PE-P4-V3	1664.1	1.8	1665.9	
	Prot. Int	0,6 rph	VE1.PI-P5-V2	1245.7	10.5	1256.2		

Percentagem	Necessidades Aquecimento	Necessidades Arrefecimento	Necessidades Totais
%	kWh	kWh	kWh
0	2134.7	223.6	2219.5
20	1874.1	179.2	1942.4
40	1613.5	134.9	1665.3
60	1352.8	90.5	1388.1
80	1092.2	46.2	1111.0
100	831.6	1.8	833.9

Níveis de Qualidade		
%	Nível	Cor
0-20	N1	
20-40	N2	
40-60	N3	
60-80	N4	
80-100	N5	

Figura 42 – Classificação das soluções orientadas a Sul segundo os níveis de qualidade

Orientação NORTE								
Isolamento na Parede	Tipo de Vidro	Proteção Solar	Ventilação	Simulação	Necessidades Aquecimento kWh	Necessidades Arrefecimento kWh	Necessidades Totais kWh	
0 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,6 rph	VE1.PI-P1-V2	3294.0	1.4	3295.4	
			0,4 rph	VE1.SP-P2-V1	2661.0	18.6	2679.6	
		Sem Prot.	0,6 rph	VE1.SP-P2-V2	3029.0	18.5	3047.5	
			0,8 rph	VE1.SP-P2-V3	3438.1	18.5	3456.6	
		Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,4 rph	VE1.PI-P2-V1	2402.9	1.4	2404.3
				0,6 rph	VE1.PI-P2-V2	2790.0	1.4	2791.4
2 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,8 rph	VE1.PI-P2-V3	3179.0	1.4	3180.4	
			0,4 rph	VE1.PE-P2-V1	2248.5	1.0	2249.5	
		Prot. Ext.	0,6 rph	VE1.PE-P2-V2	2635.7	1.0	2636.7	
			0,8 rph	VE1.PE-P2-V3	3024.0	1.0	3025.0	
		Sem Prot.	0,4 rph	VE2.SP-P2-V1	2501.6	5.5	2507.1	
			0,6 rph	VE2.SP-P2-V2	2890.9	5.0	2895.9	
	Vidro Baixa Emissividade	Prot. Int.	0,8 rph	VE2.SP-P2-V3	3281.0	5.5	3286.5	
			0,4 rph	VE2.PI-P2-V1	2346.2	0.4	2346.6	
		Prot. Ext.	0,6 rph	VE2.PI-P2-V2	2734.7	0.4	2735.1	
			0,8 rph	VE2.PI-P2-V3	3124.6	0.4	3125.0	
		Sem Prot.	0,4 rph	VE2.PE-P2-V1	2191.0	0.2	2191.2	
			0,6 rph	VE2.PE-P2-V2	2578.8	0.2	2579.0	
	4 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,8 rph	VE2.PE-P2-V3	2968.1	0.2	2968.3
				0,4 rph	VE1.SP-P3-V1	2511.0	19.7	2530.7
			Sem Prot.	0,6 rph	VE1.SP-P3-V2	2898.9	19.7	2918.6
				0,8 rph	VE1.SP-P3-V3	3288.3	19.7	3308.0
			Prot. Ext.	0,4 rph	VE1.PI-P3-V1	2254.4	1.4	2255.8
				0,6 rph	VE1.PI-P3-V2	2642.0	1.4	2643.4
Vidro Baixa Emissividade		Prot. Int.	0,8 rph	VE1.PI-P3-V3	3030.3	1.4	3031.7	
			0,4 rph	VE1.PE-P3-V1	2101.8	1.0	2102.8	
		Prot. Ext.	0,6 rph	VE1.PE-P3-V2	2487.7	1.0	2488.7	
			0,8 rph	VE1.PE-P3-V3	2875.1	1.0	2876.1	
		Sem Prot.	0,4 rph	VE2.SP-P3-V1	2352.9	6.0	2358.9	
			0,6 rph	VE2.SP-P3-V2	2741.5	6.0	2747.5	
6 cm Isol.		Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,8 rph	VE2.SP-P3-V3	3130.8	6.0	3136.8
				0,4 rph	VE2.PI-P3-V1	2198.3	0.5	2198.8
			Prot. Ext.	0,6 rph	VE2.PI-P3-V2	2585.8	0.5	2586.3
				0,8 rph	VE2.PI-P3-V3	2974.4	0.5	2974.9
			Sem Prot.	0,4 rph	VE2.PE-P3-V1	1998.4	0.2	1998.6
				0,6 rph	VE2.PE-P3-V2	2431.4	0.2	2431.6
	Vidro Baixa Emissividade	Prot. Int.	0,8 rph	VE2.PE-P3-V3	2818.6	0.2	2818.8	
			0,4 rph	VE1.SP-P4-V1	2434.0	20.3	2454.3	
		Prot. Ext.	0,6 rph	VE1.SP-P4-V2	2822.0	20.2	2842.2	
			0,8 rph	VE1.SP-P4-V3	3211.5	20.3	3231.8	
		Sem Prot.	0,4 rph	VE1.PI-P4-V1	2177.9	1.5	2179.4	
			0,6 rph	VE1.PI-P4-V2	2563.8	1.5	2565.3	
	8 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,8 rph	VE1.PI-P4-V3	2952.6	1.5	2954.1
				0,4 rph	VE1.PE-P4-V1	2024.9	1.0	2025.9
			Prot. Ext.	0,6 rph	VE1.PE-P4-V2	2409.9	1.0	2410.9
				0,8 rph	VE1.PE-P4-V3	2798.0	1.0	2799.0
			Sem Prot.	0,4 rph	VE2.SP-P4-V1	2276.0	6.2	2282.2
				0,6 rph	VE2.SP-P4-V2	2664.9	6.2	2671.1
Vidro Baixa Emissividade		Prot. Int.	0,8 rph	VE2.SP-P4-V3	3053.2	6.2	3059.4	
			0,4 rph	VE2.PI-P4-V1	2122.3	0.5	2122.8	
		Prot. Ext.	0,6 rph	VE2.PI-P4-V2	2509.8	0.5	2510.3	
			0,8 rph	VE2.PI-P4-V3	2897.4	0.5	2897.9	
		Sem Prot.	0,4 rph	VE2.PE-P4-V1	1964.9	0.2	1965.1	
			0,6 rph	VE2.PE-P4-V2	2352.1	0.3	2352.4	
Vidro Duplo Corrente		Prot. Int.	0,8 rph	VE2.PE-P4-V3	2740.8	0.3	2741.1	
			0,6 rph	VE1.PI-P5-V2	2516.0	1.4	2517.4	

Percentagem	Necessidades Aquecimento kWh	Necessidades Arrefecimento kWh	Necessidades Totais kWh
%	kWh	kWh	kWh
0	3438.1	20.3	3456.6
20	3143.5	16.3	3158.3
40	2848.8	12.3	2860.0
60	2554.2	8.2	2561.7
80	2259.5	4.2	2263.4
100	1964.9	0.2	1965.1

Níveis de Qualidade		
%	Nível	Cor
0-20	N1	
20-40	N2	
40-60	N3	
60-80	N4	
80-100	N5	

Figura 43 – Classificação das soluções orientadas a Norte segundo os níveis de qualidade

Orientação ESTE							
Isolamento na Parede	Tipo de Vidro	Proteção Solar	Ventilação	Simulação	Necessidades Aquecimento kWh	Necessidades Arrefecimento kWh	Necessidades Totais kWh
0 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,6 rph	VE1.PI-P1-V2	1838.4	4.1	1842.5
			0,4 rph	VE1.SP-P2-V1	2176.0	68.7	2244.7
		Sem Prot.	0,6 rph	VE1.SP-P2-V2	2555.0	68.8	2623.8
			0,8 rph	VE1.SP-P2-V3	2938.6	68.8	3007.4
		Prot. Int.	0,4 rph	VE1.PI-P2-V1	1931.6	4.1	1935.7
			0,6 rph	VE1.PI-P2-V2	2307.5	4.1	2311.61
2 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,8 rph	VE1.PI-P2-V3	2688.0	4.1	2692.1
			0,4 rph	VE1.PE-P2-V1	1786.2	2.3	1788.5
		Prot. Ext.	0,6 rph	VE1.PE-P2-V2	2162.2	2.3	2164.45
			0,8 rph	VE1.PE-P2-V3	2540.5	2.3	2542.8
		Sem Prot.	0,4 rph	VE2.SP-P2-V1	2106.7	24.4	2131.1
			0,6 rph	VE2.SP-P2-V2	2489.6	23.1	2512.7
	Vidro Baixa Emissividade	Sem Prot.	0,8 rph	VE2.SP-P2-V3	2874.2	23.1	2897.3
			0,4 rph	VE2.PI-P2-V1	1957.7	2.3	1960
		Prot. Int.	0,6 rph	VE2.PI-P2-V2	2337.8	2.3	2340.1
			0,8 rph	VE2.PI-P2-V3	2722.8	2.2	2725
		Prot. Ext.	0,4 rph	VE2.PE-P2-V1	1805.6	1.4	1807
			0,6 rph	VE2.PE-P2-V2	2186.2	1.3	2187.5
4 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Sem Prot.	0,8 rph	VE2.PE-P2-V3	2570.0	1.3	2571.3
			0,4 rph	VE1.SP-P3-V1	2036.8	72.2	2109
			0,6 rph	VE1.SP-P3-V2	2416.3	72.2	2488.5
		Prot. Int.	0,8 rph	VE1.SP-P3-V3	2795.9	72.2	2868.1
			0,4 rph	VE1.PI-P3-V1	1796.5	4	1800.5
			0,6 rph	VE1.PI-P3-V2	2171.5	4.1	2175.6
		Prot. Ext.	0,8 rph	VE1.PI-P3-V3	2551.3	4	2555.3
			0,4 rph	VE1.PE-P3-V1	1651.2	2.2	1653.4
			0,6 rph	VE1.PE-P3-V2	2022.6	2.2	2024.8
	Vidro Baixa Emissividade	Sem Prot.	0,8 rph	VE1.PE-P3-V3	2403.3	2.2	2405.5
			0,4 rph	VE2.SP-P3-V1	1967.3	24.4	1991.7
			0,6 rph	VE2.SP-P3-V2	2348.4	24.4	2372.8
		Prot. Int.	0,8 rph	VE2.SP-P3-V3	2732.6	24.4	2757
			0,4 rph	VE2.PI-P3-V1	1816.8	2.3	1819.1
			0,6 rph	VE2.PI-P3-V2	2197.6	2.3	2199.9
		Prot. Ext.	0,8 rph	VE2.PI-P3-V3	2581.7	2.3	2584
			0,4 rph	VE2.PE-P3-V1	1669.8	1.4	1671.2
			0,6 rph	VE2.PE-P3-V2	2047.6	1.4	2049
6 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Sem Prot.	0,8 rph	VE2.PE-P3-V3	2430.0	1.4	2431.4
			0,4 rph	VE1.SP-P4-V1	1967.2	73.6	2040.8
			0,6 rph	VE1.SP-P4-V2	2344.5	73.5	2418
		Prot. Int.	0,8 rph	VE1.SP-P4-V3	2725.3	73.5	2798.8
			0,4 rph	VE1.PI-P4-V1	1726.0	4.4	1730.4
			0,6 rph	VE1.PI-P4-V2	2098.3	4.2	2102.5
		Prot. Ext.	0,8 rph	VE1.PI-P4-V3	2479.3	4.2	2483.5
			0,4 rph	VE1.PE-P4-V1	1583.5	2.3	1585.8
			0,6 rph	VE1.PE-P4-V2	1953.4	2.3	1955.7
	Vidro Baixa Emissividade	Sem Prot.	0,8 rph	VE1.PE-P4-V3	2332.4	2.3	2334.7
			0,4 rph	VE2.SP-P4-V1	1895.4	24.4	1919.8
			0,6 rph	VE2.SP-P4-V2	2275.5	25	2300.5
		Prot. Int.	0,8 rph	VE2.SP-P4-V3	2660.1	25	2685.1
			0,4 rph	VE2.PI-P4-V1	1746.3	2.3	1748.6
			0,6 rph	VE2.PI-P4-V2	2125.8	2.3	2128.1
		Prot. Ext.	0,8 rph	VE2.PI-P4-V3	2509.0	2.3	2511.3
			0,4 rph	VE2.PE-P4-V1	1599.9	1.4	1601.3
			0,6 rph	VE2.PE-P4-V2	1975.5	1.4	1976.9
8 cm Isol.	Vidro Duplo Corrente	Prot. Int.	0,8 rph	VE2.PE-P4-V3	2357.9	1.4	2359.3
			0,6 rph	VE1.PI-P5-V2	2053.0	4.4	2057.4
			0,4 rph				

Porcentagem	Necessidades Aquecimento kWh	Necessidades Arrefecimento kWh	Necessidades Totais kWh
0	2938.6	73.6	3007.4
20	2667.6	59.1	2723.1
40	2396.6	44.7	2438.8
60	2125.5	30.2	2154.4
80	1854.5	15.8	1870.1
100	1583.5	1.3	1585.8

Níveis de Qualidade		
%	Nível	Cor
0-20	N1	
20-40	N2	
40-60	N3	
60-80	N4	
80-100	N5	

Figura 44 – Classificação das soluções orientadas a Este segundo os níveis de qualidade

5.3. SOLUÇÃO PROPOSTA

A análise por níveis de qualidade permitiu identificar com facilidade não só os melhores cenários como também os cenários a evitar. A melhor solução encontrada obteve um consumo total de 833,9 kWh/ano, apresentando as características da figura 45.

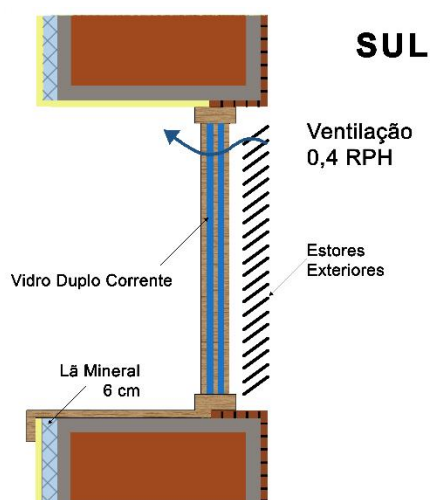


Figura 45 – Solução ótima dos cenários simulados

Contudo, numa intervenção de reabilitação nem todos os parâmetros considerados podem ser alterados:

- Como se tratam de edifícios do Centro Histórico, a colocação de proteção solar pelo exterior é impedida devido ao valor arquitetónico da fachada do edifício, pelo que terá de se optar por **portadas interiores de madeira**;
- A **orientação** de edifícios já existentes não pode ser alterada, sendo necessário definir soluções para as variadas orientações.

Na figura 46 estão esquematizadas as soluções ideais para cada orientação, considerando os impedimentos acima descritos. Consta-se que apenas varia o tipo de vidro, sendo as restantes variáveis comuns, com uma ventilação de 0,4 renovações por hora na estação de aquecimento, 6 cm de isolamento térmico na parede de fachada e portadas interiores de madeira.

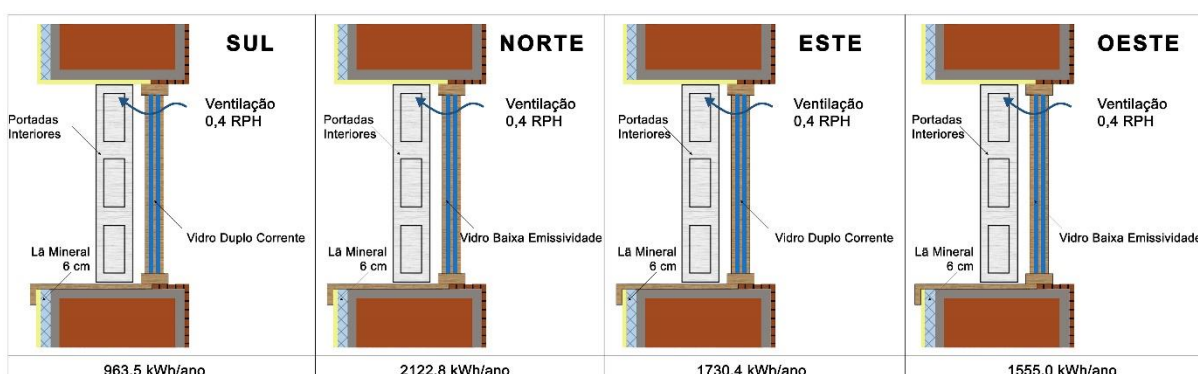


Figura 46 – Soluções propostas

6

CONCLUSÕES

6.1. RECOMENDAÇÕES PARA A PRÁTICA DA REABILITAÇÃO

Na realização deste trabalho, foram estudados os edifícios antigos reabilitados do Centro Histórico do Porto, tendo como objetivo quantificar o seu desempenho térmico e energético utilizando de ferramentas de cálculo.

Através do *software* de simulação higrotérmica avançada WUFI®Plus, foi utilizado um modelo geométrico representativo dos edifícios em estudo para avaliar a influência da variação de certos parâmetros (espessura de isolamento nas paredes de fachada, tipo de vidro, proteção solar e ventilação) no consumo de energia necessário para atingir o conforto térmico.

Após a discussão dos resultados do estudo de sensibilidade, é possível traçar recomendações práticas para a reabilitação dos edifícios em estudo.

Relativamente à **ventilação**, é fundamental minimizar o caudal de renovação de ar no Inverno para as 0,4 renovações por hora, permitindo uma redução drástica dos consumos para aquecimento. Por outro lado, é também importante considerar um caudal de renovação mínimo para garantir a qualidade do ar e a diminuição do risco de condensações. No Verão, é importante ventilar bastante durante a noite, renovando o ar interior 4 vezes por hora para arrefecer o espaço interior de forma passiva. Recomenda-se a abertura de janelas durante os períodos em que a temperatura exterior é superior à interior, no Inverno, e na situação inversa, no Verão, sendo neste último caso recomendadas 0,6 renovações por hora.

Na reabilitação de **paredes de fachada**, a colocação de isolamento térmico é fundamental na redução das necessidades de aquecimento. Em regime de aquecimento contínuo, a poupança de energia é considerável, especialmente quando a parede é orientada a Norte, sendo recomendável a colocação de 6 cm de isolamento térmico pelo interior.

Na reabilitação dos **vãos envidraçados**, a investigação desenvolvida evidenciou que em algumas circunstâncias pode ser recomendável utilizar vidros com características diferentes para diferentes orientações dos vãos. No quadrante Sul, onde a incidência de radiação solar é elevada, recomenda-se a utilização de vidros com fator solar elevado para reduzir os consumos energéticos no Inverno. Por outro lado, no quadrante Norte, onde a incidência de radiação solar é reduzida, recomenda-se a utilização de vidros baixo emissivos com fator solar baixo que garantam a conservação do calor no espaço interior, durante a estação de aquecimento. No quadrante Oeste, como as necessidades de arrefecimento são elevadas, recomenda-se um vidro com baixo fator solar. No quadrante Este, recomenda-se um vidro com elevado fator solar para aproveitar a radiação solar incidente.

A influência da **proteção solar** nos consumos energéticos para arrefecimento é elevada, sendo recomendável a utilização de portadas interiores de madeira (solução tradicional) nos períodos em que a temperatura é mais elevada. No Inverno, as proteções devem ser ativadas apenas no período da noite (das 22h às 8h), conferindo uma resistência térmica adicional aos vãos envidraçados.

Os desafios da reabilitação energética de edifícios antigos são complexos pois abordam um número considerável de variáveis. É importante efetuar estudos de sensibilidade que permitam avaliar o seu desempenho térmico e energético com vista na redução dos consumos e no aumento do conforto térmico. Estas análises procuram também garantir que a reabilitação seja feita de um modo pensado e estruturado, procurando uma solução ótima para cada caso.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em conta que existem outros parâmetros que têm influência no conforto térmico e nos consumos energéticos de um edifício, são sugeridas as seguintes análises para investigação futura:

- Análise custo-benefício das alterações propostas;
- Análise de apartamentos sob cobertura;
- Influência de diferentes condições de utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Parlamento Europeu e do Conselho, "Diretiva 2002/91/CE", *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 2002.
- [2] Parlamento Europeu e do Conselho, "Diretiva 2010/31/UE ", *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 2010.
- [3] Parlamento Europeu e do Conselho, "Diretiva 2012/27/UE", *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 2012.
- [4] *Regulamento das Características do Comportamento Térmico (RCCTE) - Decreto Lei nº 40/90 de 6 de Fevereiro*, 1990.
- [5] *Regulamento das Características do Comportamento Térmico (RCCTE) - Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril*, 2006.
- [6] *Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios (REH) - Decreto-Lei n.º 118/2013*, 2013.
- [7] *Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios (REH) - Decreto-Lei n.º 251/2015*, 2015.
- [8] INE. (2011). *Edifícios segundo os Censos: total e por época de construção - Portugal* Disponível em:
<http://www.pordata.pt/Portugal/Edif%C3%A9cios+segundo+os+Censos+total+e+por+%C3%A9poca+de+constru%C3%A7%C3%A3o-93> *Edifícios segundo os Censos: total e por época de construção - Portugal* Acedido em: 20 de Fevereiro de 2017
- [9] A. Costa *et al.*, *Structural rehabilitation of old buildings*: Springer, 2014.
- [10] INE I.P., "O parque habitacional e a sua reabilitação : análise e evolução : 2001-2011," ed. Lisboa-Portugal, 2013.
- [11] PORTO VIVO SRU - Sociedade de Reabilitação Urbana da Baixa Portuense S.A. Revitalização Urbana e Social da Baixa do Porto - MASTERPLAN (Síntese Executiva). Acedido em: 5 de Março de 2017
- [12] PORTO VIVO SRU - Sociedade de Reabilitação Urbana da Baixa Portuense S.A. (2017). *Atividade da PORTO VIVO, SRU regista novo crescimento* Disponível em:
<http://www.portovivosru.pt/pt/noticias/2017/01/31/atividade-da-porto-vivo-sru-regista-novo-crescimento> *Atividade da PORTO VIVO, SRU regista novo crescimento* Acedido em: 2 de Junho 2017
- [13] Direção Geral de Energia e Geologia, *ENERGIA em Portugal 2014*: APREN, 2016
- [14] V. P. d. Freitas *et al.*, *Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos*: Ordem dos Engenheiros da Região Norte, Porto, 2012.
- [15] F. B. Fernandes, *Transformação e Permanência na Habitação Portuense: As formas da casa na forma da cidade*: FAUP, 1999.
- [16] J. Teixeira, "Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX. Contributo para uma história da construção arquitectónica em Portugal", 2004.
- [17] J. Appleton, *Reabilitação de Edifícios Antigos: Patologias e tecnologias de intervenção*, 2003.

- [18] PORTO VIVO SRU - Sociedade de Reabilitação Urbana da Baixa Portuense S.A. *Operação C do Programa de Realojamento para o Morro da Sé_CH.1* Disponível em: http://www.portovivosru.pt/morro_se/index.php?m=28 *Operação C do Programa de Realojamento para o Morro da Sé_CH.1* Acedido em: 5 de Março de 2017
- [19] V. P. d. Freitas *et al.*, "Reabilitação de Edifícios do Centro Histórico do Porto. Guia de Termos de Referência para o Desempenho Energético Ambiental", 2010.
- [20] PORTO VIVO SRU - Sociedade de Reabilitação Urbana da Baixa Portuense S.A. *Operação G do Programa de Realojamento para o Morro da Sé_CH.1* Disponível em: http://www.portovivosru.pt/morro_se/index.php?m=35 *Operação G do Programa de Realojamento para o Morro da Sé_CH.1* Acedido em: 5 de Março de 2017
- [21] V. P. d. Freitas *et al.*, "Edifícios existentes—Medidas de melhoria de desempenho energético e da qualidade do ar interior", *ADENE—Agência para a Energia*, 2011.
- [22] I. Anselmo *et al.*, "Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais", *Documento técnico, Lisboa: Agência para a Energia*, 2004.
- [23] ADENE e LNEC, "Sistemas de Ventilação", *10 Soluções Eficiência Energética*, 2016.
- [24] Direção Geral de Energia e Geologia, *Portaria n.º 349-B/2013* Diário da República, 2013
- [25] Direção Geral de Energia e Geologia, "Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010," ed. Lisboa-Portugal, 2011.
- [26] Direção Geral de Energia e Geologia, *ENERGIA em Portugal 2013*: APREN, 2015
- [27] Direção Geral de Energia e Geologia, *ENERGIA em Portugal 2015*: APREN, 2017
- [28] INE/DGEG. (2014). *Consumo doméstico de energia eléctrica por consumidor (kWh/ cons.) por Localização geográfica (NUTS - 2013)* Disponível em: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0008225&contexto=bd&selTab=tab2 *Consumo doméstico de energia eléctrica por consumidor (kWh/ cons.) por Localização geográfica (NUTS - 2013)* Acedido em: 25 de Fevereiro de 2017
- [29] DGEG/Mec e PORDATA. (2017). *Consumo de energia eléctrica: total e por tipo de consumo - Portugal* Disponível em: <http://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+el%C3%A9ctrica+total+e+por+tipo+d+e+consumo-1124> *Consumo de energia eléctrica: total e por tipo de consumo - Portugal* Acedido em: 20 de Fevereiro de 2017
- [30] DGEG Estatísticas do carvão petróleo energia eléctrica e gás natural. (2017). *Consumo doméstico de gás natural (Nm³) por Local de residência; Anual* Disponível em: https://ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0002099&contexto=bd&selTab=tab2&xlang=pt *Consumo doméstico de gás natural (Nm³) por Local de residência; Anual* Acedido em: 20 de Fevereiro de 2017
- [31] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas de Venda a Clientes Finais em 2010* Portal ERSE, 2009 Acedido em: 10 de Março de 2017
- [32] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas de Venda a Clientes Finais em 2012* Portal ERSE, 2011 Acedido em: 10 de Março de 2017
- [33] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas de Venda a Clientes Finais em 2013* Portal ERSE, 2012 Acedido em: 10 de Março de 2017

- [34] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas de Venda a Clientes Finais em 2014* Portal ERSE, 2013 Acedido em: 10 de Março de 2017
- [35] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas de Venda a Clientes Finais em 2011* Portal ERSE, 2010 Acedido em: 10 de Março de 2017
- [36] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas e Preços de Gás Natural para o gás 2009-2010* Portal ERSE, 2009 Acedido em: 10 de Março de 2017
- [37] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas e Preços de Gás Natural para o gás 2011-2012* Portal ERSE, 2011 Acedido em: 10 de Março de 2017
- [38] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas e Preços de Gás Natural para o gás 2012-2013* Portal ERSE, 2012 Acedido em: 10 de Março de 2017
- [39] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas e Preços de Gás Natural para o gás 2013-2014* Portal ERSE, 2013 Acedido em: 10 de Março de 2017
- [40] Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, *Tarifas e Preços de Gás Natural para o gás 2010-2011* Portal ERSE, 2010 Acedido em: 10 de Março de 2017
- [41] DGERT/MTSSS e PORDATA. (2017). *Salário mínimo nacional - Portugal* Disponível em: <http://www.pordata.pt/Portugal/Sal%C3%A1rio+m%C3%ADnimo+nacional-74> *Salário mínimo nacional - Portugal* Acedido em: 25 de Fevereiro de 2017
- [42] S. Magalhães, "Avaliação do Índice de Desconforto Passivo de Edifícios de Habitação Reabilitados do Sul da Europa," Projeto de Tese de Investigação, Departamento de Engenharia Civil, Secção de Construções, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.
- [43] *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics* prENrev 15251, 2006.
- [44] E. Barreira *et al.*, "Procedures in the construction of a test reference year for Porto-Portugal and implications for hygrothermal simulation", *Sustainable Cities and Society*, vol. 32, pp. 397-410, 2017.
- [45] Direção Geral de Energia e Geologia, *Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013* Diário da República, 2013
- [46] C. P. d. Santos e L. Matias, *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. Lisboa, 2006.
- [47] Direção Geral de Energia e Geologia, *Portaria n.º 379-A/2015* Diário da República, 2015

ANEXO A

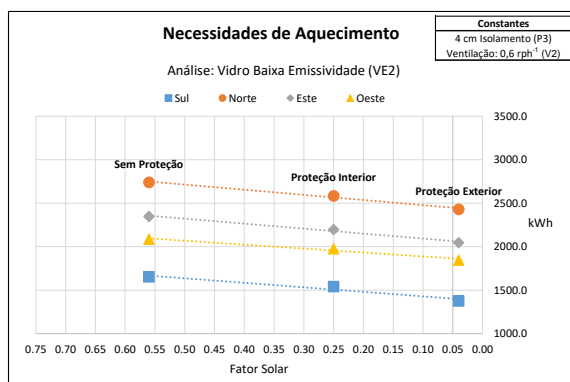
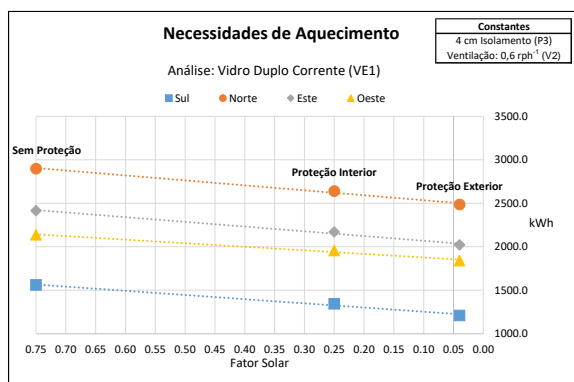
ANÁLISE DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS

ANÁLISE DA VENTILAÇÃO

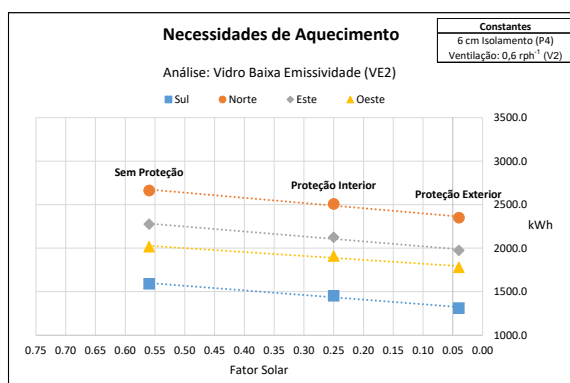
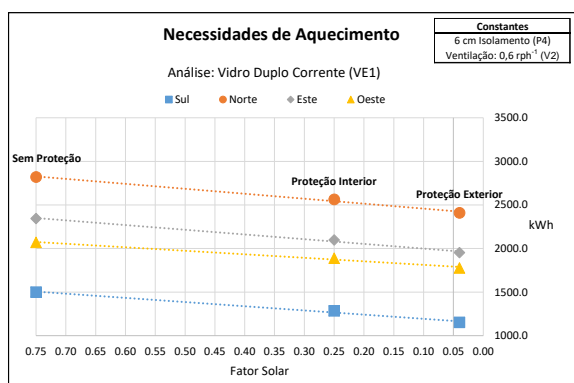
ANÁLISE DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS

NECESSIDADES DE AQUECIMENTO

Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
					kWh	€	kWh	€	kWh	€	kWh	€
VE1.SP-P3-V2	3.30	0.75 (Sem Prot.)	4	Estção de Aquecimento	2898.9	579.8	1561.0	312.2	2416.3	483.3	2138.0	427.6
VE1.PI-P3-V2	2.80	0.25 (Prot. Interior)	4	0,6 rph	2642.0	528.4	1344.0	268.8	2171.5	434.3	1956.5	391.3
VE1.PE-P3-V2	2.50	0.04 (Prot. Exterior)	4		2487.7	497.5	1210.0	242.0	2022.6	404.5	1840.8	368.2
VE2.SP-P3-V2	2.60	0.56 (Sem Prot.)	4	Estção de Aquecimento	2741.5	548.3	1653.4	330.7	2348.4	469.7	2087.3	417.5
VE2.PI-P3-V2	2.30	0.25 (Prot. Interior)	4	0,6 rph	2585.8	517.2	1541.3	308.3	2197.6	439.5	1976.1	395.2
VE2.PE-P3-V2	2.00	0.04 (Prot. Exterior)	4		2431.4	486.3	1375.6	275.1	2047.6	409.5	1847.1	369.4



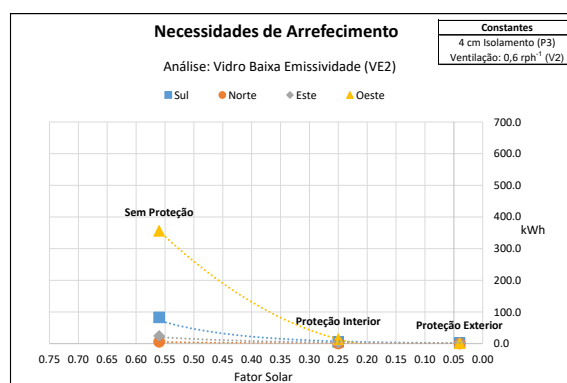
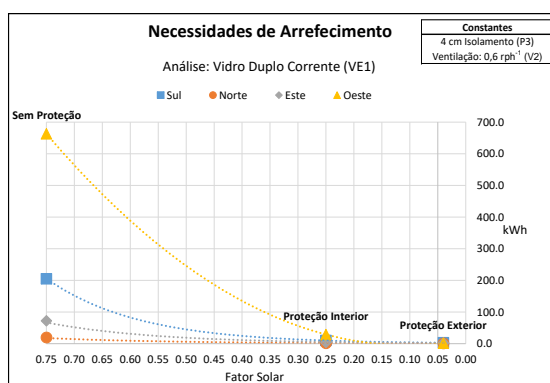
Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
					kWh	€	kWh	€	kWh	€	kWh	€
VE1.SP-P4-V2	3.30	0.75 (Sem Prot.)	6	Estção de Aquecimento	2822.0	564.4	1500.0	300.0	2344.5	468.9	2070.0	414.0
VE1.PI-P4-V2	2.80	0.25 (Prot. Interior)	6	0,6 rph	2563.8	512.8	1284.0	256.8	2098.3	419.7	1889.0	377.8
VE1.PE-P4-V2	2.50	0.04 (Prot. Exterior)	6		2409.9	482.0	1152.0	230.4	1953.4	390.7	1777.0	355.4
VE2.SP-P4-V2	2.60	0.56 (Sem Prot.)	6	Estção de Aquecimento	2664.9	533.0	1590.6	318.1	2275.5	455.1	2017.8	403.6
VE2.PI-P4-V2	2.30	0.25 (Prot. Interior)	6	0,6 rph	2509.8	502.0	1453.7	290.7	2125.8	425.2	1910.1	382.0
VE2.PE-P4-V2	2.00	0.04 (Prot. Exterior)	6		2352.1	470.4	1312.4	262.5	1975.5	395.1	1779.8	356.0



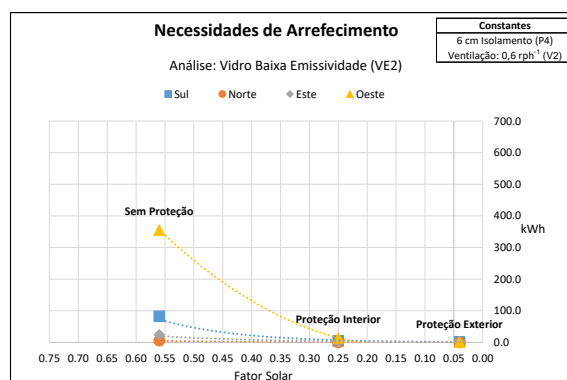
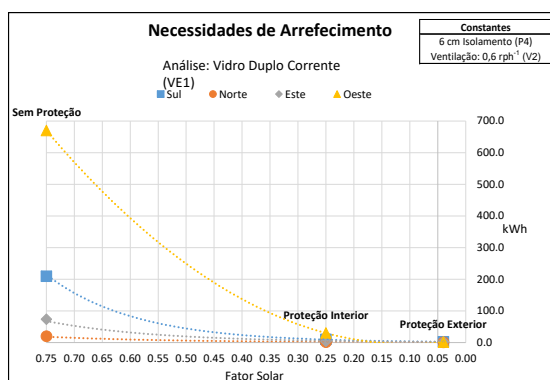
ANÁLISE DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS

NECESSIDADES DE ARREFECIMENTO

Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Arrefecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
VE1.SP-P3-V2	3.3	0.75 (Sem Prot.)	4	Estção de Aquecimento 0,6 rph	19.7	3.9	205.0	41.0	72.2	14.4	663.3	132.7
VE1.PI-P3-V2	2.8	0.25 (Prot. Interior)	4		1.4	0.8	10.0	3.6	4.1	2.2	29.0	8.5
VE1.PE-P3-V2	2.5	0.04 (Prot. Exterior)	4		1.0	0.2	2.7	0.5	2.2	0.4	1.5	0.3
VE2.SP-P3-V2	2.6	0.56 (Sem Prot.)	4	Estção de Aquecimento 0,6 rph	6.0	1.2	83.0	16.6	24.4	4.9	355.9	71.2
VE2.PI-P3-V2	2.3	0.25 (Prot. Interior)	4		0.5	0.1	5.3	1.1	2.3	0.5	14.3	2.9
VE2.PE-P3-V2	2.0	0.04 (Prot. Exterior)	4		0.2	0.0	1.8	0.4	1.4	0.3	1.1	0.2



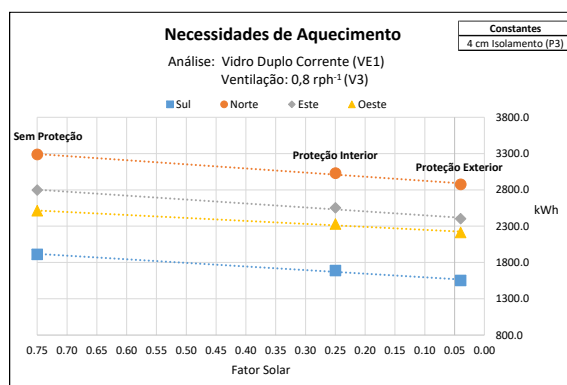
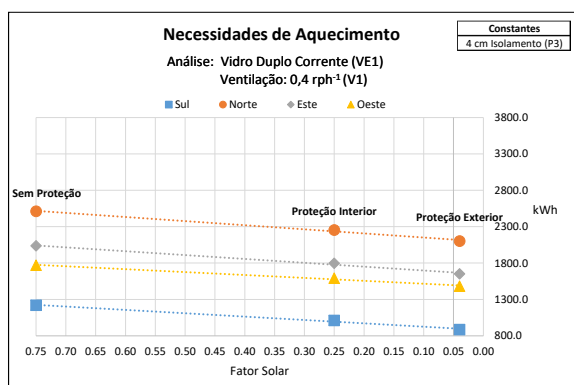
Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Arrefecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
VE1.SP-P4-V2	3.3	0.75 (Sem Prot.)	6	Estção de Aquecimento 0,6 rph	20.2	4.0	209.3	41.9	73.5	14.7	670.0	134.0
VE1.PI-P4-V2	2.8	0.25 (Prot. Interior)	6		1.5	0.8	10.0	3.7	4.2	2.2	30.0	8.6
VE1.PE-P4-V2	2.5	0.04 (Prot. Exterior)	6		1.0	0.2	2.3	0.5	2.3	0.5	1.4	0.3
VE2.SP-P4-V2	2.6	0.56 (Sem Prot.)	6	Estção de Aquecimento 0,6 rph	6.2	1.2	85.1	17.0	25.0	5.0	359.3	71.9
VE2.PI-P4-V2	2.3	0.25 (Prot. Interior)	6		0.5	0.1	5.2	1.0	2.3	0.5	14.3	2.9
VE2.PE-P4-V2	2.0	0.04 (Prot. Exterior)	6		0.3	0.1	1.8	0.4	1.4	0.3	1.0	0.2



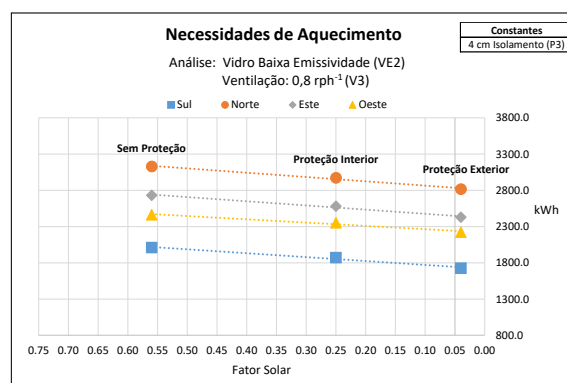
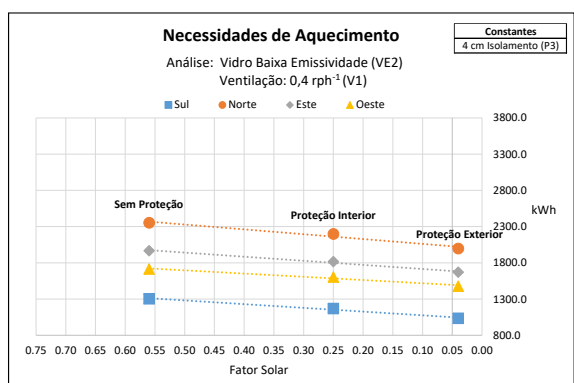
ANÁLISE DA VENTILAÇÃO

NECESSIDADES DE AQUECIMENTO

Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
VE1.SP-P3-V1	3.3	0.75 (Sem Prot.)	4	Estação de Aquecimento	2511.0	502.2	1220.5	244.1	2036.8	407.4	1770.0	354.0
VE1.PI-P3-V1	2.8	0.25 (Prot. Interior)	4		2254.4	450.9	1011.6	202.3	1796.5	359.3	1592.7	318.5
VE1.PE-P3-V1	2.5	0.04 (Prot. Exterior)	4	0,4 rph-1	2101.8	420.4	886.1	177.2	1651.2	330.2	1480.8	296.2
VE1.SP-P3-V3	3.3	0.75 (Sem Prot.)	4	Estação de Aquecimento	3288.3	657.7	1911.8	382.4	2795.9	559.2	2511.6	502.3
VE1.PI-P3-V3	2.8	0.25 (Prot. Interior)	4		3030.3	606.1	1688.3	337.7	2551.3	510.3	2328.7	465.7
VE1.PE-P3-V3	2.5	0.04 (Prot. Exterior)	4	0,8 rph-1	2875.1	575.0	1551.8	310.4	2403.3	480.7	2213.0	442.6



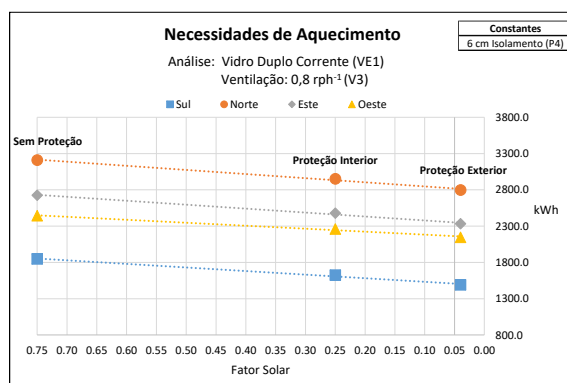
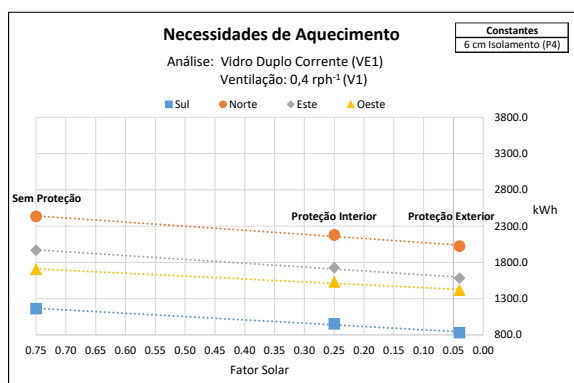
Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
VE2.SP-P3-V1	2.6	0.56 (Sem Prot.)	4	Estação de Aquecimento	2352.9	470.6	1304.9	261.0	1967.3	393.5	1715.4	343.1
VE2.PI-P3-V1	2.3	0.25 (Prot. Interior)	4		2198.3	439.7	1168.9	233.8	1816.8	363.4	1605.7	321.1
VE2.PE-P3-V1	2.0	0.04 (Prot. Exterior)	4	0,4 rph	1998.4	399.7	1033.8	206.8	1669.8	334.0	1479.1	295.8
VE2.SP-P3-V3	2.6	0.56 (Sem Prot.)	4	Estação de Aquecimento	3130.8	626.2	2011.8	402.4	2732.6	546.5	2463.7	492.7
VE2.PI-P3-V3	2.3	0.25 (Prot. Interior)	4		2974.4	594.9	1871.3	374.3	2581.7	516.3	2353.0	470.6
VE2.PE-P3-V3	2.0	0.04 (Prot. Exterior)	4	0,8 rph	2818.6	563.7	1727.6	345.5	2430.0	486.0	2222.9	444.6



ANÁLISE DA VENTILAÇÃO

NECESSIDADES DE AQUECIMENTO

Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
VE1.SP-P4-V1	3.3	0.75 (Sem Prot.)	6	Estação de Aquecimento	2434.0	486.8	1162.0	232.4	1967.2	393.4	1704.5	340.9
VE1.PI-P4-V1	2.8	0.25 (Prot. Interior)	6		2177.9	435.6	953.5	190.7	1726.0	345.2	1529.5	305.9
VE1.PE-P4-V1	2.5	0.04 (Prot. Exterior)	6	0,4 rph	2024.9	405.0	831.6	166.3	1583.5	316.7	1414.9	283.0
VE1.SP-P4-V3	3.3	0.75 (Sem Prot.)	6	Estação de Aquecimento	3211.5	642.3	1849.4	369.9	2725.3	545.1	2443.2	488.6
VE1.PI-P4-V3	2.8	0.25 (Prot. Interior)	6		2952.6	590.5	1625.5	325.1	2479.3	495.9	2260.5	452.1
VE1.PE-P4-V3	2.5	0.04 (Prot. Exterior)	6	0,8 rph	2798.0	559.6	1491.7	298.3	2332.4	466.5	2145.1	429.0



Casos	Variáveis		Constantes		Necessidades de Aquecimento							
	Vãos Envidraçados (Uwdn)	Proteção Solar (gT)	Isolamento Interior Lã Mineral (cm)	Ventilação	Norte		Sul		Este		Oeste	
VE2.SP-P4-V1	2.6	0.56 (Sem Prot.)	6	Estação de Aquecimento	2276.0	455.2	1243.4	248.7	1895.4	379.1	1647.4	329.5
VE2.PI-P4-V1	2.3	0.25 (Prot. Interior)	6		2122.3	424.5	1110.2	222.0	1746.3	349.3	1540.7	308.1
VE2.PE-P4-V1	2.0	0.04 (Prot. Exterior)	6	0,4 rph	1964.9	393.0	972.8	194.6	1599.9	320.0	1413.2	282.6
VE2.SP-P4-V3	2.6	0.56 (Sem Prot.)	6	Estação de Aquecimento	3053.2	610.6	1948.7	389.7	2660.1	532.0	2395.1	479.0
VE2.PI-P4-V3	2.3	0.25 (Prot. Interior)	6		2897.4	579.5	1807.0	361.4	2509.0	501.8	2285.2	457.0
VE2.PE-P4-V3	2.0	0.04 (Prot. Exterior)	6	0,8 rph	2740.8	548.2	1664.1	332.8	2357.9	471.6	2152.9	430.6

